



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN
SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

PROCESADO DE IMÁGENES EN TERAHERCIOS EN 3D

Amaia Mangado del Rincón

Juan Carlos Iriarte Galarregui

Pamplona, 6 de Septiembre 2012



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

E.T.S.I.I. y de Telecomunicación

Campus de Arrosadía s/n

31006-Pamplona Navarra-Spain

Tfno: 34-948-169000 Fax: 34-948-169169

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

Acta de Proyecto Final de Carrera

Título: “Procesado de imágenes en Terahercios en 3D”

Alumno: Amaia Mangado del Rincón

Tutor del Proyecto: Juan Carlos Iriarte Galarregui

Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros,

Presidente,

Secretario,

Vocal 1º,

Fdo:.....

Fdo:.....

Fdo:.....

acuerda otorgar la calificación de

Pamplona,.....de.....de 20.....

Este proyecto fin de carrera, no hubiese sido posible sin la ayuda de mi tutor Juan Carlos Iriarte Galarregui, que con sus consejos y su paciencia me ha ayudado mucho.

También he de agradecer todo el apoyo recibido por parte de mis padres y mi hermana, pero sobre todo a David por intentar ayudarme y soportarme todo este tiempo.

A mis amigos porque aunque no comprendieran de qué iba siempre me preguntaban por el proyecto.

Y a mis amigos, compañeros de carrera, nos hemos ayudado mutuamente y hemos conseguido una buena amistad.

Muchas gracias a todos.

Resumen

Los THz han experimentado un gran avance en los últimos años apareciendo gran cantidad de aplicaciones que se pueden beneficiar de la información obtenida de materiales y objetos en este rango frecuencial, bien sea desde el punto de vista de la espectrometría de THz o desde la toma de imágenes.

En este proyecto se explican las distintas aplicaciones en donde se utilizan las imágenes en THz, como en el campo de la seguridad, el de la medicina y la diferencia que existen entre la captación de datos por medio de pulsos y por medio de ondas continuas.

A la hora de representar las imágenes de THz es interesante no solo representarla en 2D, sino ser capaces de pintarla en 3D para obtener más información de la misma. Por eso, este proyecto pretende representar objetos en 3D.

El proyecto en sí, busca la creación de objetos en 3D a través de datos capturados en THz utilizando los recursos del laboratorio de THz del Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra. Para ello, se ha creado una interfaz gráfica programada en Matlab y varias funciones que permiten la búsqueda de picos y máximos de la señal en el tiempo proveniente de la reflexión del objeto que permitan dibujar el mismo.

Estas funciones permiten crear una matriz en dos dimensiones en las que se observan los máximos en reflexión del objeto y en función de un límite, introducido por el usuario, hacer transparentes las partes que no aporten información en la imagen tridimensional. Tras la creación de esta imagen se ejecutará la función que crea la matriz en 3D.

Por último, se podrá crear una imagen en 3D en función de un plano de corte. Esto permitirá visualizar cómo se comporta el objeto en su interior visualizando distintas capas del mismo. Todos los objetos en 3D se podrán rotar.

Mediante la interfaz gráfica se consigue automatizar el sistema y disminuir el tiempo de ejecución de las funciones ya que se guardan en memoria diferentes parámetros.

Al final del proyecto se muestra un ejemplo de todos los objetos obtenidos, las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación.

Por último se encuentran los anexos, en los que se muestra todo el código programado en Matlab además de un manual en donde se explica cómo utilizar el programa.

Abstract

THz technology has experimented a great advance in last years. A lot of applications have benefited of the information obtained from materials and objects in this frequency range, from the point of view of THz spectrometry, as well as from images.

In this project, different applications are explained in which THz images are used, such as security or medicine field. Differences in data collecting by pulses or continuous waves are shown.

THz images are interesting not only if they are showed in 2D, but also in 3D. More information can be obtained from them, as depth is another parameter to work with. Therefore, the aim of the project is to create 3D images from the adquired data in THz range. Using the resources of the Antennas Group from the Public University of Navarra.

A graphical interface programmed on Matlab has been created and also several functions that allow the searching of peaks and maximums of the time domain signal obtained from the reflection of the object, to be able to draw its 3D.

These functions allow creating a 2D matrix in which the maximums levels of the reflected signal at each pixel of the object are observed. Adjusting a limit in the interface, which is introduced by the user, the useless areas for the 3D image will become transparent. After the creation of this 2D image, the function that creates the 3D matrix will be run to represent the 3D image.

The 3D image can be shown adjusting the initial cut plane of the figure. This will let the visualization of how the object behaves inside of it by viewing its different layers. It will be possible to rotate all the 3D objects.

Thanks to the graphical interface the system is automatized and the runtime of functions is reduced because the different parameters are saved in memory, reducing processing time.

At the end of the project, an example of the representation of different objects is shown, to continue with, conclusions and future research.

Finally the annexes are shown, where all programmed code on Matlab appears, and also a manual where it is explained how to use the program.

Índice

Objetivos	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	3
1.1 Introducción	3
1.2 Región espectral de los Terahercios	4
CAPÍTULO 2: IMÁGENES EN THZ.	9
2.1 Imágenes en Terahercios	9
2.2 Aplicaciones de las imágenes en Terahercios	12
2.2.1 Campo de la seguridad	13
2.2.2 Campo de la industria	14
2.2.2.1 Contenido de agua en las hojas	17
2.2.2.2 Evaluación no destructiva de corchos	18
2.2.3 Campo de la biomedicina	20
2.2.3.1 Oncología	20
2.2.3.2 Salud dental	24
2.2.3.3 Dermatología	25
2.2.4 Otros campos de aplicación	26
2.2.4.1 Estructura molecular	26
2.2.4.2 Cambios en el estado de la materia	27
2.2.4.3 Imágenes de THz de sustancias en polvos	28
CAPÍTULO 3: TOMA DE DATOS Y DISEÑO DEL SOFTWARE.	31
3.1 Introducción a imágenes en 3D	31
3.2 Sistema de toma de datos en THz	33
3.3 Software de tratamiento de datos	34
3.3.1 Realización cortes	38
3.3.2 Realización imagen en 3D	43
3.3.3 Realización corte en 3D	46
3.4 Ejemplos de datos	48
3.4.1 Objeto metal	48
3.4.2 Objeto cartón	51
3.4.3 CD	54
3.4.4 Hoja	57
CAPITULO 4: LÍNEAS FUTURAS Y CONCLUSIONES.	61
4.1 Conclusiones	61
4.2 Líneas futuras	63

ANEXO A: Funciones del programa	65
Anexo A.1: Función vol3D	65
Anexo A.2: Script separación	69
Anexo A.3: Función recta	70
Anexo A.4: Función maximocorte	71
Anexo A.5: Función crear3	72
Anexo A.6: Función matrizcorte	73
ANEXO B: Interfaz	75
ANEXO C: Manual de uso	83
C.1 Introducción	83
C.2 Iniciar el programa	83
C.3 Pantalla principal	83
C.4 Parámetros importantes del programa	84
C.5 Cargar datos	84
C.6 Corte en dos dimensiones	86
C.7 Realización del objeto en 3D	87
C.8 Realización del objeto en 3D empezando desde un plano de corte	88
C.9 Rotación objetos	89
REFERENCIAS	91

Lista de figuras

<i>Figura 1: Espectro electromagnético. Se observan los diferentes campos y sus frecuencias.</i>	4
<i>Figura 2: Espectro radioeléctrico.</i>	4
<i>Figura 3: Imágenes en THz, a) con diferentes condiciones de visibilidad, b) detección armas ocultas con escáner en un aeropuerto.</i>	6
<i>Figura 4: Tabla con las aplicaciones de los THz en los diferentes campos.</i>	8
<i>Figura 5: Setup THz-TDS</i>	10
<i>Figura 6: Dos diodos láser para imágenes con ondas continuas</i>	11
<i>Figura 7: Aplicaciones THz</i>	12
<i>Figura 8: a) Imagen en el rango visible de una persona con objetos ocultos debajo de la ropa. b) Imagen de la misma persona obtenida a 0.35 THz. Se observan dos objetos claramente visibles.</i>	13
<i>Figura 9: Imagen en la que se muestra un hombre de imagen en THz mirando hacia adelante con diferentes tipos de armas, el mismo hombre en el visible mirando hacia atrás y otra vez el hombre mirando hacia atrás en la imagen en THz.</i>	14
<i>Figura 10: Imagen en el rango Terahercios superpuesta a la visible. Imagen en THz captada a 3 THz en la transmisión. En la imagen se observa (1) nervaduras de refuerzo de la bolsa, (2) etiquetas de papel y (3) las diferentes regiones del elemento.</i>	15
<i>Figura 11: a) imagen en el rango visible y b) imagen en THz. Se muestra una hoja con superposición de lóbulos, piezas de metal superpuestas y un agujero.</i>	15
<i>Figura 12: a) Imagen en el visible de una rodaja de chorizo con pequeños trozos de vidrio y metal adheridos. b) Imagen en THz. Se observa como el vidrio y el metal reflejan más, por ello su cambio de color a más azulón.</i>	16
<i>Figura 13: Imagen en THz de una hoja en transmisión en tres días distintos y su comparación con la imagen en el visible.</i>	17
<i>Figura 14: La imagen (a) corresponde a una imagen visible de la parte frontal del corcho, la imagen (b) es una imagen visible de la parte trasera del corcho, la parte en contacto con el vino y la imagen (c) es la imagen THz de la los primeros 4.35 mm de la parte frontal del corcho.</i>	19
<i>Figura 15: La imagen (a) corresponde a una imagen visible de la parte frontal del corcho, la imagen (b) es una imagen visible de la parte trasera del corcho y la imagen (c) es la imagen THz de la los primeros 4.02 mm de la parte frontal del corcho.</i>	19

- Figura 16: La imagen (a) y (b) parte frontal y posterior de la muestra en el visible. Imágenes en THz, (c) y (d) imágenes donde se muestran las fisuras. La imagen (d) se obtiene con una resolución de 100 μm .* 20
- Figura 17: a) Imagen visible de tejido con cáncer de piel. La línea continua representa la región de tejido enfermo y la línea discontinua la región con tejido sano. b) Imagen en THz medida con un espectrómetro en el dominio del tiempo en modo de reflexión, (n_1 , n_2 tejido sano: i_1 , i_2 tejido inflamado: d_1 , d_2 tejido enfermo). A simple vista se observan las diferencias entre un tejido y otro.* 21
- Figura 18: Imagen THz de un cáncer de piel en la superficie y en el interior del tejido.* 21
- Figura 19: Imagen en el visible e imágenes en 0.5 THz, 0.7 THz y 0.9 THz de un tumor. Se distingue la zona sana de la cancerígena.* 22
- Figura 20: (a) imagen óptica de una muestra de la laringe de un cerdo donde se distinguen los distintos tejidos.* 22
- Figura 21: (b) Imagen en transmisión de una muestra recogida en frecuencias de entre 1.0 y 1.5 THz. (c) Imagen en transmisión de una muestra recogida en frecuencias de entre 0.2 y 0.5 THz.* 23
- Figura 22: Comparación entre la absorción del tejido blando (línea continua) y la absorción del cartílago (línea discontinua).* 23
- Figura 23: Imagen de un diente humano en el visible e imagen del mismo diente en THz donde se observan las cavidades en morado.* 24
- Figura 24: La parte superior izquierda es una imagen de muestra de un diente en rodajas y las otras imágenes corresponden a aquellas conseguidas en las frecuencias de THz que se encuentran en su correspondiente recuadro.* 25
- Figura 25: Imagen en la que se muestra el cuerpo humano con diferente absorción en función de si está cubierto por ropa o si no o de si se ha aplicado algún tipo de cosmético.* 26
- Figura 26: Se muestran las diferencias de absorción del DNA cuando sus cadenas están hibridadas o desnaturalizadas.* 27
- Figura 27: Espectro THz de los polvos seleccionados: harina de trigo, azúcar y talco.* 29
- Figura 28: Tabla de los tamaños de grano de las diferentes muestras.* 30
- Figura 29: (izquierda) Imágenes de cáscara de huevo y (derecha) de plástico en una muestra de azúcar en polvo.* 30
- Figura 30: Imágenes de ecografías en diferentes planos en 2D y en 3D.* 31
- Figura 31: Imágenes en Matlab de un cráneo para una misma figura desde ángulos diferentes.* 32

<i>Figura 32: Imágenes obtenidas del equipo de medida utilizado. a) Sistema reflexión. b) Sistema transmisión con lentes. c) Sistema posicionamiento objeto. d) Sistema transmisión medida muestra.</i>	33
<i>Figura 33: Diagrama del esquema general de los pasos que hay que seguir para ejecutar el programa.</i>	35
<i>Figura 34: Imagen de la pantalla de Matlab ejecutando el programa.</i>	36
<i>Figura 35: Imagen de la interfaz del programa.</i>	36
<i>Figura 36: Ventana emergente donde se eligen los datos.</i>	37
<i>Figura 37: Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la función.</i>	38
<i>Figura 38: Diagrama de bloques de la función.</i>	39
<i>Figura 39: Sistema de toma de imágenes.</i>	39
<i>Figura 40: Captura de disposición de los datos.</i>	40
<i>Figura 41: Imagen de un pixel frente al eje Z en tiempo. Cada punto representa un punto a cierta distancia de la bocina.</i>	40
<i>Figura 42: Imagen de recta correspondiente al punto (21,40).</i>	42
<i>Figura 43: a) Imagen en la posición (21,40) en todos sus puntos, en este caso 401. b) Imagen de la misma posición pero sumando la recta correspondiente.</i>	42
<i>Figura 44: a) Imagen de los máximos con un límite de -21. b) Imagen con límite de -12.5.</i>	43
<i>Figura 45: Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la función.</i>	43
<i>Figura 46: Diagrama de bloques de la función.</i>	44
<i>Figura 47: Imagen de la señal en un punto indicando el 1º y 2º máximo</i>	45
<i>Figura 48: a) Imagen en 3D visto desde arriba. b) Imagen en 3D pero rotado y visto desde abajo</i>	46
<i>Figura 49: Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la función.</i>	46
<i>Figura 50: Diagrama de bloques de la función.</i>	47
<i>Figura 51: La imagen en 3D comenzando en el corte 240.</i>	47
<i>Figura 52: La imagen del objeto de cartón y el de metal.</i>	49
<i>Figura 53: Imagen del objeto de metal con las tres zonas diferenciadas.</i>	49
<i>Figura 54: La imagen en 3D con un límite de -25 con vista desde abajo.</i>	50
<i>Figura 55: La imagen en 3D con un límite de -25 vista desde arriba.</i>	50
<i>Figura 56: La imagen en 3D con límite de -25 y corte en 105.</i>	51

<i>Figura 56: a) Imagen del objeto de cartón con las tres zonas diferenciadas. b) Imagen de los hexágonos del cartón.</i>	52
<i>Figura 57: La imagen en 3D con un límite de -23 vista de lado.</i>	52
<i>Figura 58: La imagen en 3D con un límite de -23 visto de perfil.</i>	53
<i>Figura 59: Imagen en 3D con un límite de -23 y corte 100.</i>	53
<i>Figura 60: La imagen en 3D con un límite de -23 visto desde arriba.</i>	54
<i>Figura 61: La imagen de un ejemplo de CD</i>	55
<i>Figura 62: La imagen en 3D con un límite de -25 visto desde abajo.</i>	56
<i>Figura 63: La imagen en 3D con un límite de -25 visto de lateral.</i>	56
<i>Figura 64: La imagen en 3D con un límite de -25 y con corte 250.</i>	57
<i>Figura 65: La imagen original de la hoja</i>	58
<i>Figura 66: La imagen en 3D con un límite de -12.5 visto desde abajo.</i>	58
<i>Figura 67: La imagen en 3D con un límite de -12.5 y corte 240.</i>	59
<i>Figura C.1: Interfaz principal.</i>	83
<i>Figura C.2: Interfaz principal y ventana de cargar los datos.</i>	85
<i>Figura C.3: Interfaz principal con los datos cargados.</i>	85
<i>Figura C.4: Interfaz principal con los datos cargados y la imagen del objeto.</i>	86
<i>Figura C.5: Imagen con limite de -13.</i>	87
<i>Figura C.6: Imagen en 3D con límite de -13.</i>	88
<i>Figura C.7: Imagen 3D del objeto con limite -13 y corte 240.</i>	89
<i>Figura C.8: Imagen 3D del objeto con limite -13 y corte 240 rotado.</i>	90

Objetivos

Este proyecto consiste básicamente en la implementación de un sistema capaz de tratar los datos obtenidos en el rango de los THz de diferentes muestras y el tratamiento de estos datos para la formación de imágenes en tres dimensiones. A través de una imagen en 2D formada por los valores máximos de reflexión normalizados para cada pixel de la imagen y un límite de acotación de nivel, se realizará la imagen en 3D, la cual se podrá girar y observar, así como seleccionar en qué corte se quiere empezar a visualizar el 3D.

Primero se tratará de estudiar qué son los Terahercios, sus principios y en qué campos se utilizan centrándonos sobre todo en las imágenes. Tras esto, se captarán los datos de imágenes de distintos objetos en el dominio del tiempo y de la frecuencia para cada pixel que formará la imagen aprovechando el sistema de toma de imagen asociado al analizador de redes Agilent E.8361 C- PNA alojado en la sala limpia del laboratorio de THz del Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra. Este sistema estará formado por un emisor y receptor en el rango de 140 GHz a 220 GHz entre los que se colocará la muestra de la que se quiere tomar la imagen.

Los datos obtenidos se tratarán y se procesarán y a través de un programa en Matlab obteniéndose la imagen en 3D gracias a la incorporación temporal de la señal reflejada por el objeto, de los diferentes valores de potencia y de los diferentes materiales que lo componen.

Y por último, se realizará una interfaz gráfica que permita automatizar el sistema. Obteniendo la imagen en 3D en función del límite en dB que se elija para hacer transparente todo aquello que no pertenezca al objeto y la imagen en 3D en función del plano de corte inicial.

Resumiendo, los objetivos de este proyecto son:

1. Estudiar y comprender qué son los Terahercios, sus principios y los campos en los que se usan.
2. Captar los datos necesarios mediante el sistema de medida del Grupo de Antenas.
3. Procesar estos datos mediante algoritmos programados en Matlab.
4. Obtener cortes en 2D y limitarlos a través de un límite para después realizar la imagen en 3D en función de este.

5. Crear una interfaz gráfica donde se puedan automatizar los resultados y sea más dinámico.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El rango espectral de los Terahercios (THz) es posiblemente la parte menos explorada del espectro electromagnético. Los primeros estudios datan de 1900, cuando Rubens y Kurlbaum comenzaron a medir el espectro de emisión de un cuerpo negro sobre los 6 THz. Esto llevó a descubrir la ley de la radiación de un cuerpo negro de Max Planck.

Otro estudio se centró en analizar los datos tomados en THz y extraer la frecuencia fundamental de sus armónicos. Esto se realizó manualmente utilizando métodos ópticos hasta la década de 1950 cuando los ordenadores realizaron la Transformada de Fourier de los datos. [1]

Después de esto, durante décadas este rango frecuencial dejó de investigarse. Sin embargo hacia 1970 se descubrió que los THz podrían ayudar a la investigación astronómica.

Tras esto, los investigadores descubrieron que los THz podían detectar la presencia y composición de la materia orgánica y con ello se incrementó el desarrollo de fuentes, detectores y sistemas ópticos como por ejemplo láseres de vapor de agua, detectores piro-eléctricos, láseres de electrones libres y láseres de cascada cuántica entre otros. Estos facilitaron que se incrementara el número de investigadores centrados en este rango frecuencial.

Ahora mismo, la tecnología de los THz se encuentra en auge. Por ello se han incrementado el número de empresas que crean aplicaciones comerciales beneficiándose de las propiedades de la toma de imágenes en este rango como por ejemplo en seguridad, en biomedicina, en el sector agroalimentario, en procesos de control y en comunicaciones de banda ancha entre otras muchas. Para el uso de estas aplicaciones se necesita la creación de sensores específicos para cada una.

Además de la creación de imágenes en THz, también se caracterizan muestras mediante espectroscopia de THz determinando la respuesta espectral y se desarrollan sensores de THz heterodinos y de detección directa.

1.2 Región espectral de los Terahercios

El espectro electromagnético está conformado por las microondas, las radiaciones infrarrojas, el rango visible y los rayos X. Entre las microondas y las frecuencias infrarrojas se encuentran los THz. (Figura 1) En este, la radiación de 1 THz tiene un periodo de 1 ps, con una longitud de onda de 300 μm y el número de ondas de 33 cm^{-1} , la energía del fotón 4.1 meV y la temperatura equivalente de 47.6 K. [2]

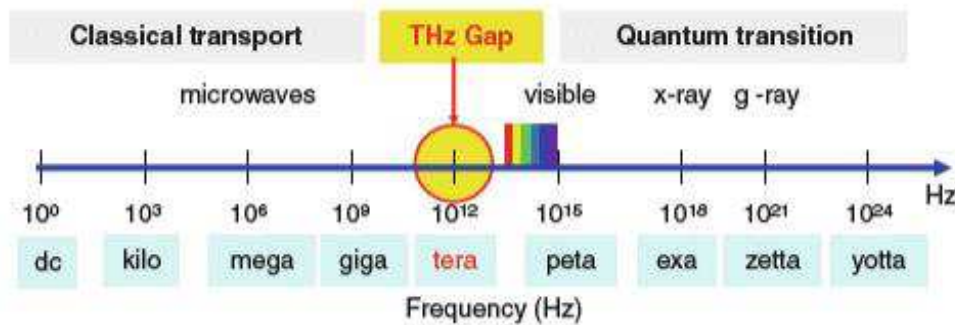


Figura 1: Espectro electromagnético. Se observan los diferentes campos y sus frecuencias.

Con la luz visible se toman fotografías, las ondas de radio transmiten el sonido y con los rayos X se pueden ver formas dentro del cuerpo humano. A esto hay que sumarle las ondas de THz, también llamadas rayos- T, que permiten crear imágenes y transmitir información.

El rango espectral de los THz se ha utilizado muy poco debido a la dificultad de encontrar fuentes y detectores ya que hasta los 100 GHz se puede utilizar electrónica convencional y por encima de los 10 THz se utiliza la generación y detección óptica de señales. El rango intermedio sin embargo no estaba cubierto por ninguna de estas.

La región intermedia que existe entre los 100 GHz y los 10 THz se divide en dos partes, las ondas milimétricas y la banda de los THz, situadas de 30 a 300 GHz y de 0.1 a 10 THz respectivamente, con lo cual entre los 100 y los 300 GHz se superponen los dos campos. [3]

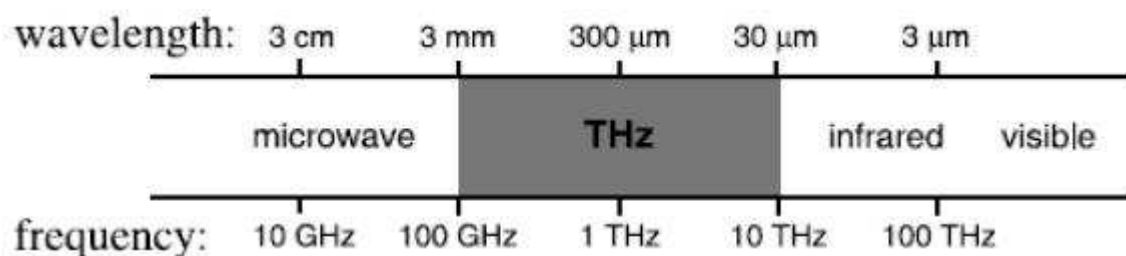


Figura 2: Espectro radioeléctrico.

Desde que comenzó a investigarse se le ha dado distintos calificativos a este rango. En sus inicios, se denominaba “far-infrared” (FIR) o infrarrojo lejano. El infrarrojo lejano se utilizó para cubrir todas las longitudes de onda desde los 20 μm hasta la región milimétrica y se basó en técnicas ópticas no lineales.

Más tarde, pasó a llamarse “short millimeter and sub-millimeter-wavelength range” (SMSMR). Este nombre no convenció y se cambió por el actual, “Terahertz” (THz). También llamado en sus inicios “Terahertz gap” debido a la dificultad de encontrar fuentes y detectores que permitiesen su investigación. [4]

Con avances en la tecnología láser y la creación de nuevas técnicas se desarrollaron los THz. Una de estas técnicas sería la espectroscopia en el dominio del tiempo (THz- TDS) en la cual se usan pulsos de láser muy rápidos. Se consiguió realizar imágenes en tiempo real y se empezó a comercializar sistemas de imagen mediante pulsos, siendo estos caros y de grandes dimensiones.

A parte del uso de pulsos, también existen los sistemas de onda continua (CW). Estos sistemas usan radiación monocromática y pueden sintonizarse a determinadas frecuencias. Comenzaron usando láser de zafiros pero debido a su enorme coste se usaron láser de diodos y sistemas de láser cuánticos en cascada (QSL), de menor coste y dimensión. [5]

El mayor problema a la hora de investigar esta región del espectro es la gran absorción de la atmosfera de la Tierra sobre la mayor parte de las frecuencias, debido a los niveles de vibración y rotación de vapor de agua. [4]

Con el paso del tiempo, pasó de ser un sector especializado en la investigación a convertirse en una región del espectro con gran importancia en una amplia gama de disciplinas como la astronomía, la medicina, la farmacología, la seguridad y defensa entre otras, siendo inicialmente la astronomía la principal razón de este interés. En conclusión, la parte de los THz del espectro electromagnético posee un potencial científico en espectroscopia e imagen que permite utilizarlo en diferentes campos.

Hasta hace poco tiempo, aunque el rango de los THz fuese grande, no podía ser utilizado en su totalidad debido a la falta de emisores y receptores adecuados para recoger y registrar la información captada. No obstante ahora mismo, existen tecnologías relacionadas con THz extendiéndose a otros campos como el de la agricultura, la medicina, la seguridad... Por esto, y por poder formar imágenes en diferentes condiciones climatológicas sea con buen tiempo o con mala visibilidad o en las distintas fases del día; durante el día y durante la noche. Además de esto, también puede atravesar la ropa, lo que permite detectar objetos ocultos, aunque también produzca rechazo al no cumplir los requisitos de privacidad.

Un punto a favor de este rango es la posibilidad de poder ver en bajas condiciones de visibilidad. Esto es una lanza a favor de los THz debido a que en el rango visible o infrarrojo no podrían usarse los sensores de detección. [6]

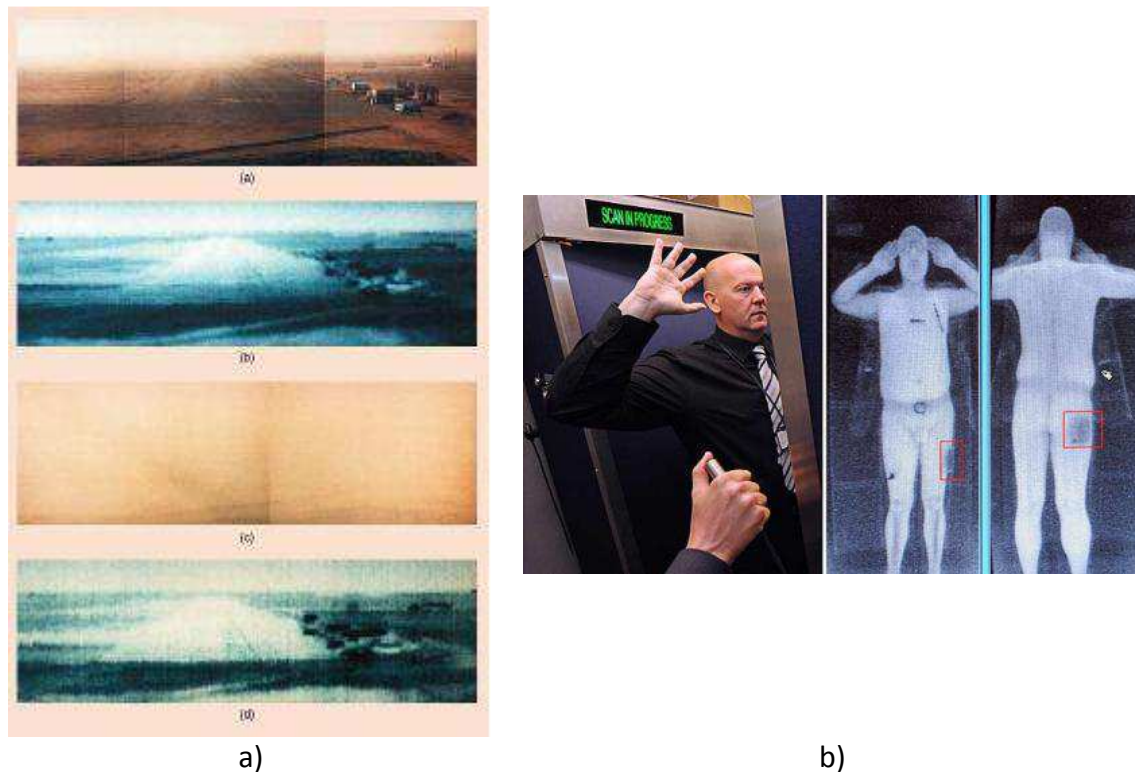


Figura 3: Imágenes en THz, a) con diferentes condiciones de visibilidad, b) detección armas ocultas con escáner en un aeropuerto.

Tanto las ondas de THz como las ondas electromagnéticas se rigen por las ecuaciones de Maxwell. (1.1) (1.2) (1.3) (1.4) Sin embargo, las ondas de THz son más complicadas de utilizar debido a su localización en el espectro electromagnético.

$$\nabla \cdot D(r, t) = \rho(r, t) \quad \text{Ley de Gauss eléctrica} \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot B(r, t) = 0 \quad \text{Ley de Gauss magnética} \quad (1.2)$$

$$\nabla \times E(r, t) + \frac{\partial}{\partial t} B(r, t) = 0 \quad \text{Ley de Faraday} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times H(r, t) - \frac{\partial}{\partial t} D(r, t) = j(r, t) \quad \text{Ley de Maxwell-Ampère} \quad (1.4)$$

Este conjunto de ecuaciones describen por completo los fenómenos electromagnéticos, reuniendo los conceptos de campo y corriente de desplazamiento y unificando los campos eléctricos y magnéticos en uno: el campo electromagnético.

A continuación se muestran diferentes aplicaciones de la banda frecuencial de los THz:

- Las ondas de THz tienen baja energía en los fotones, por lo tanto no puede llevar a la fotoionización en los tejidos biológicos como se puede hacer en las radiografías por ejemplo.
- Las ondas de THz tienen longitudes de onda mayores que las ondas visibles e infrarrojos, con lo cual estas se ven menos afectadas por la dispersión Mie. Una solución analítica a las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de la radiación electromagnética por partículas esféricas. Las ondas de THz son transparentes es decir, las atraviesa fácilmente, para la mayoría de los materiales dieléctricos secos como tela, papel, madera y plásticos, por lo que debido a esto, se pueden utilizar los THz para controles de calidad analizando sus estructuras internas. [7]
- Las señales de THz se pueden detectar en el dominio del tiempo mediante la asignación del campo eléctrico transitorio en amplitud y en fase. [2]

La radiación en THz no es ionizante, es decir, la onda no es capaz de arrancar electrones de la materia siendo esto la mayor diferencia con los rayos X. Por lo tanto permite escanear objetos y obtener imágenes sin alterar el objeto. Además de esto, se pueden obtener imágenes de forma pasiva (como sucede con las cámaras ópticas o en infrarrojo) por lo que no es necesario radiar al objeto de estudio ya que se capta la potencia que emite cada cuerpo a estas frecuencias.

En la investigación sobre la atenuación que presentan las ondas en THz se ha conocido que existen diferentes frecuencias en las cuales la atenuación difiere y cambia según los diferentes elementos atmosféricos, como por ejemplo con aire y con niebla.

Este cambio de atenuación hace que dentro del rango de los THz se desarrollen sistemas que formen buenas imágenes como por ejemplo a través de nubes y otros efectos climatológicos. En estas condiciones se atenúa un millón de veces menos en el rango frecuencial de los THz que con radiaciones visibles o infrarrojas.

Además de esto, las imágenes obtenidas a frecuencias milimétricas se encuentran muy poco afectadas tanto por la iluminación artificial como por el sol. Por lo tanto, como se ha dicho con anterioridad, estos sistemas trabajan con diferentes

condiciones de visibilidad y en diferente fase del día, siendo esto favorable para la creación de imágenes en condiciones de muy baja visibilidad.

En la figura 4 se muestra un resumen de las aplicaciones de los THz en distintos campos como la seguridad, las comunicaciones, la medicina o las espaciales. Se encuentran divididas en función de las que ya se ha demostrado su utilidad (cruz) y las que son potenciales (interrogación).

Área de aplicación	THz inferior (< 0,5 THz)	THz superior (> 0,5 THz)
Espacio (baja absorción atmosférica)		
espectroscopia/detección	X	X
imagen (p.e. fondo cósmico)	X	X
comunicaciones	?	?
Laboratorio (~1 m distancia de propagación)		
espectroscopia	X	X
imagen (p.e. campo cercano y lejano)	X	X
comunicaciones	X	?
Industrial (~1 m distancia de propagación)		
espectroscopia	X	X
detección (p.e. humedad)	X	X
imagen (p.e. campo cercano y lejano)	X	X
comunicaciones	?	?
Medicina (~1 m distancia de propagación)		
imagen (p.e. piel, dientes)	X	X
Seguridad		
detección (p.e. cribado)	X	?
imagen (p.e. localizar armas)	X	?
comunicaciones	X	?

Figura 4: Tabla con las aplicaciones de los THz en los diferentes campos.

CAPÍTULO 2: IMÁGENES EN THZ.

2.1 Imágenes en Terahercios

Existen dos tipos de sistemas para tomar imágenes en THz, las continuas y las de pulsos. En ambos casos, el ancho de banda de las ondas continuas y de los pulsos son generados por las muestras y la captura sea en modo transición o en modo reflexión.

En modo transición el detector se encuentra en el otro lado de la muestra para detectar las ondas y en el modo reflexión el detector se coloca en el mismo lado de estas. El transmisor se posiciona según se encuentre la muestra.

- Imagen de THz por pulsos: THz- TDS

En estas imágenes, los pulsos ópticos ultracortos pueden ser generados por óptica no lineal o por dipolos de antenas. En el dominio del tiempo los pulsos se dirigen hacia la muestra e interactúan con ella.

La figura 5 muestra un ejemplo de un sistema con dos antenas fotoconductoras que emiten y detectan los pulsos.

Los pulsos se producen por un láser de aluminio (Al_2O_3) con una velocidad de repetición de 80 MHz. Estos pulsos pueden estar retrasados con dos líneas de retardo. Un impulso eléctrico corto se genera cuando la antena emisora genera un impulso óptico. La ley de Maxwell sobre campos electromagnéticos viene dada por la derivada de su pico de corriente, debido a esto, el campo electromagnético emite en THz si el pulso eléctrico se eleva suficientemente rápido. Las ondas interactúan con la muestra y las ondas transmitidas se centran en la antena detectora. [8]

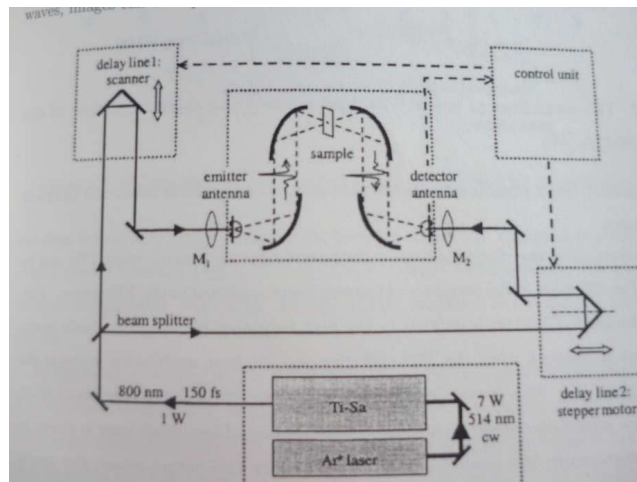


Figura 5: Setup THz-TDS

- Imagen con ondas continuas

Existen diferentes maneras para generar y detectar ondas continuas como por ejemplo un láser de gas y la mezcla entre un láser con dos diodos y el láser de una cascada cuántica.

El primer método se consigue mediante la imagen mezcla de los diodos láser en un fotoconductor, produciéndose así la onda continua. La diferencia entre estos dos láseres se sintoniza con la región en THz. De esta manera, la onda se emite en la frecuencia de los láseres de diodo. La corriente continua es detectada cuando la radiación en THz y la modulación llegan en fase a los receptores. Un fallo de este método es la poca potencia de salida que obtiene teniendo así baja resolución espacial.

El otro método consiste en el láser de una cascada cuántica (QCLs). El QCLs es un semiconductor. La emisión de luz se produce a través de las transiciones cuánticas entre subbandas y entre los estados superior e inferior del láser. Después, los electrones se eliminan con un extractor y luego se alimenta por la parte activa más próxima al tubo resonante. Este método produce gran potencia de salida pero requiere un enfriamiento criogénico lo que hace que no sea ni compacto, ni portátil, ni barato.

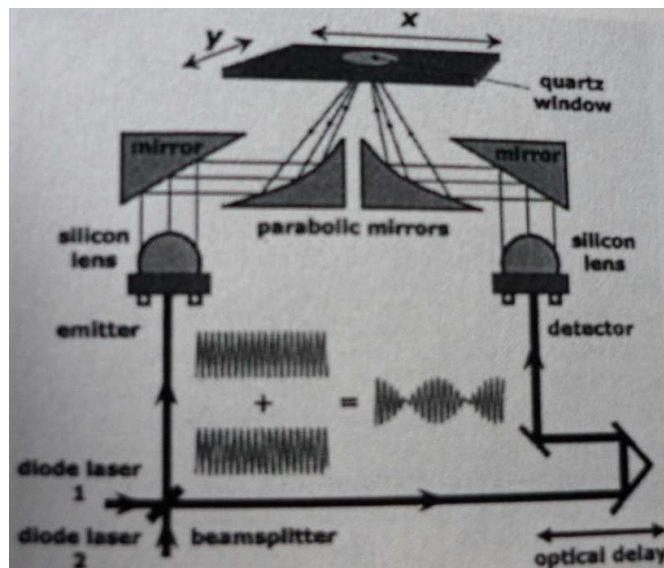


Figura 6: Dos diodos láser para imágenes con ondas continuas

Y por último, el láser de gas, un método no muy costoso y con una potencia de salida que permite la obtención de imágenes. La fuente del láser de gas se encuentra en la cavidad del gas (cavidad FIR) emitiendo CO_2 a una baja presión para radiar a la frecuencia dentro del rango de los THz que se necesite ya que estos pueden proporcionar una amplia gama de frecuencias con potencias de mW. [9]

Además los sistemas de imagen en THz se pueden dividir en dos tipos según el método de toma de imágenes: activos o pasivos. Las cámaras pasivas son similares a las cámaras de infrarrojo. Estas detectan la radiación natural que emite un objeto o la radiación de THz de los alrededores de este que puede ser dispersada o reflejada por el objeto. Los sistemas de cámaras activas usan algún tipo de fuente de THz para la iluminación del objeto, lo que se podría comparar con las cámaras de fotos del visible en tomar una imagen con flash (activa) o sin flash (pasiva). [10]

Otro método de clasificación estaría basado en la resolución espacial. En un sistema convencional de imagen, la resolución espacial está limitada por la longitud de onda y el diámetro. Para superar estas limitaciones se necesita utilizar imágenes de campo cercano o técnicas de microscopia. A frecuencias de THz esto permite que la resolución espacial de la longitud se reduzca hasta 1/10000 veces la longitud de onda.

Esto es relevante en aplicaciones biológicas, por ejemplo, en imágenes de partes interiores de una célula o en la inspección de dispositivos semiconductores que requieren una resolución por debajo de los micrómetros.

Para la adquisición de imágenes en tiempo real se necesita una buena relación señal ruido SNR, suficiente con 20 dB, y adecuada resolución espacial.

En general las consideraciones prácticas como el coste, la complejidad y la facilidad de manipulación limitan el uso de los sistemas de imágenes de THz a aplicaciones especializadas de ciencia. [11]

2.2 Aplicaciones de las imágenes en Terahercios

Las imágenes en Terahercios son comunes en el campo de la astronomía siendo datada la primera en 1960. Las primeras imágenes aplicadas en un campo distinto de la astronomía se obtuvieron en 1975, año en el que se creó un sistema de imágenes basado en un láser HCN (cloruro de hidrógeno) a 337 μm y un detector de THz basado en LED. Con este sistema se obtuvieron imágenes de THz de objetos ocultos a través del foco del haz del láser. Además de esto, se determinó la transmisión a través de algunos materiales de embalaje de uso común, de ropa y de muestras biológicas en las frecuencias comprendidas entre los 0.3 y los 0.9 THz. [12]

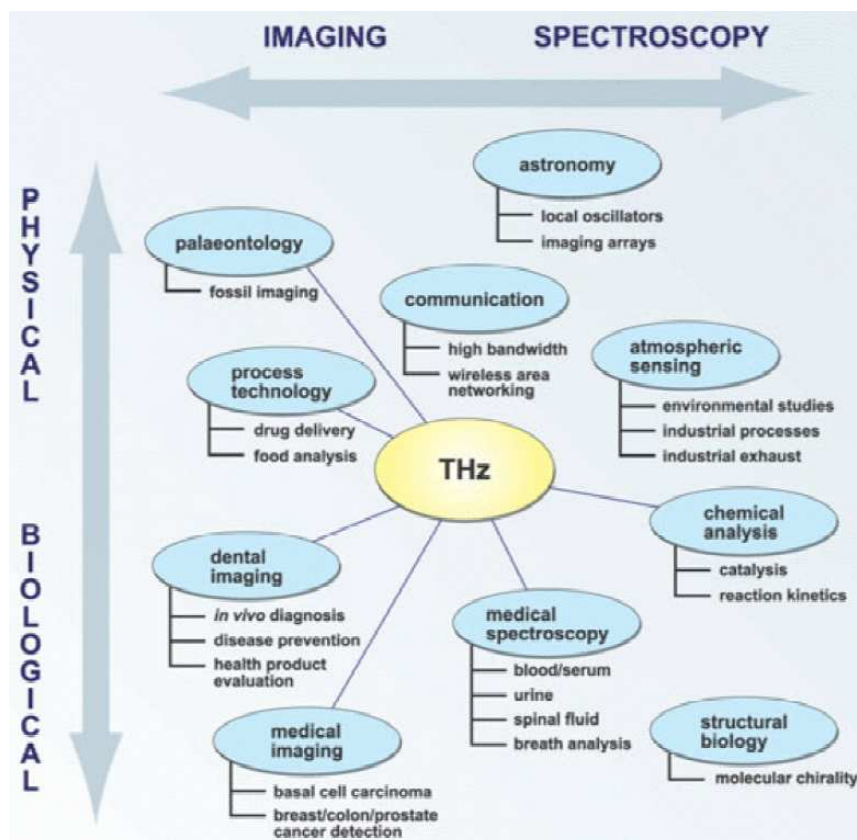


Figura 7: Aplicaciones THz

Con la creación de estos sistemas, se descubrió que las imágenes en THz podrían ser de gran ayuda en otros campos. A continuación se muestran diferentes aplicaciones en los distintos campos:

2.2.1 Campo de la seguridad

En el campo de la seguridad, las imágenes en THz sirven de gran ayuda debido a la capacidad de radiación de los THz de penetrar en diferentes sustancias como ropas y embalajes, lo que supone que sea capaz de localizar y distinguir del objeto por ejemplo las armas ocultas, los explosivos y los objetos extraños en alimentación, todo esto a gran distancia. Esto sería caracterizado por un detector pasivo debido a que detecta por el contraste de temperaturas ya que todos los cuerpos emiten en este rango frecuencial.

En comparación con un escáner de radiación milimétrica, aquellos sistemas que evalúan en las zonas de seguridad de aeropuertos, los sistemas de THz son más eficaces debido a la abertura de entrada mucho más pequeña que las de las cámaras de radiación milimétrica. Estos operan a 30 GHz, con una resolución espacial en torno a 1 mm y una distancia menor de 1 m mientras que en Terahercios, a 0.35 THz el sistema tiene una resolución alrededor de 1.5 cm a 8 m de una distancia con 0.5 m de diámetro de abertura. (Figura 8). Esto permite el uso de estas dos imágenes para controles de seguridad y para cualquier tipo de video vigilancia. [12]

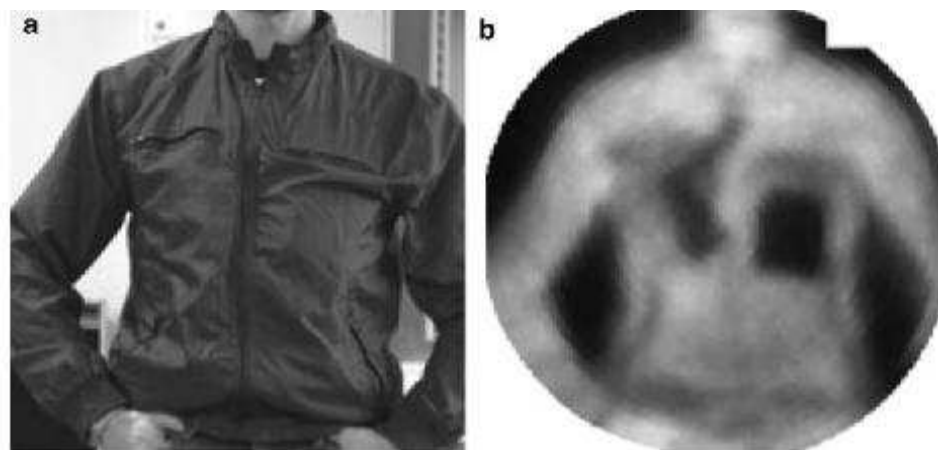


Figura 8: a) Imagen en el rango visible de una persona con objetos ocultos debajo de la ropa. b) Imagen de la misma persona obtenida a 0.35 THz. Se observan dos objetos claramente visibles.

Los inconvenientes de esta tecnología es que son capaces de exponer públicamente el cuerpo desnudo, esto incumple los derechos de privacidad de las personas y puede ser inaceptable para muchas por razones de ética y privacidad. Para

resolver esto, los sistemas actuales solapan la imagen del visible con la imagen de THz o simplemente muestran un aviso sobre la imagen del visible en caso de detección positiva.

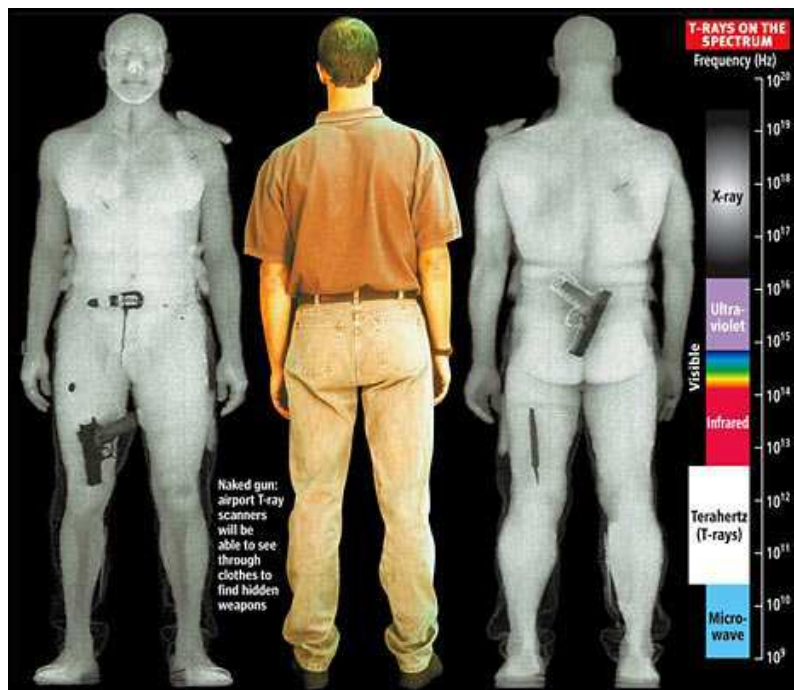


Figura 9: Imagen en la que se muestra un hombre de imagen en THz mirando hacia adelante con diferentes tipos de armas, el mismo hombre en el visible mirando hacia atrás y otra vez el hombre mirando hacia atrás en la imagen en THz.

En la figura 9 se observa a un hombre mirando hacia delante y hacia atrás en el rango de los THz. Se ven perfectamente los elementos metálicos como las armas, los punzones y las hebillas debido a la diferencia de radiación entre el cuerpo humano y los metales. Esto hace que se pueda identificar fácilmente lo que es metal y lo que es cuerpo humano.

2.2.2 Campo de la industria

En aplicaciones para el campo de la industria la imagen en THz es usada para procesos de control o para ensayos no destructivos (NDT). Estas aplicaciones también están basadas en la capacidad de los Terahercios en penetrar y en incidir en los diferentes materiales y plásticos.

El primer ensayo fue utilizando un láser de gas que iluminaba un cable de alta tensión. Durante la producción de estos se midió la radiación que dispersaba siendo

los huecos por donde circulan menores a $100\ \mu\text{m}$ de diámetro. Se estableció un mecanismo de barrido del cable, el cual permitió crear imágenes. [12]

Un ejemplo de NDT sería la detección de un defecto de aislamiento térmico en una bolsa de transporte superior en comparación con otros métodos de prueba establecidos en otros rangos frecuenciales.

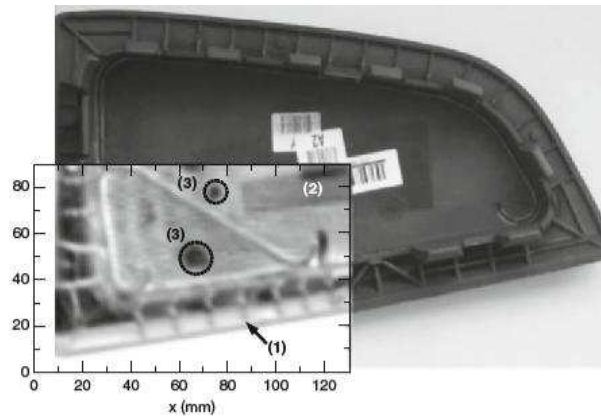


Figura 10: Imagen en el rango Terahercios superpuesta a la visible. Imagen en THz captada a 3 THz en la transmisión. En la imagen se observa (1) nervaduras de refuerzo de la bolsa, (2) etiquetas de papel y (3) las diferentes regiones del elemento.

Otro ejemplo del campo industrial de interés es el agroalimentario y el vinícola. En las hojas se realizan pruebas y medidas no destructivas debidas a la transparencia de los THz. Según el material del objeto solapado en cuestión, absorberá o reflejará más o menos en función de este.

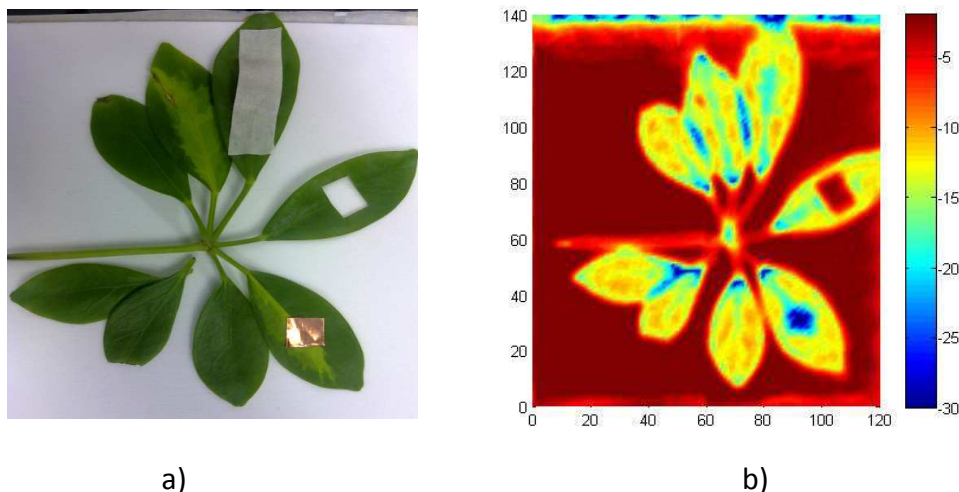


Figura 11: a) imagen en el rango visible y b) imagen en THz. Se muestra una hoja con superposición de lóbulos, piezas de metal superpuestas y un agujero.

En la figura 11 se observa una hoja en transmisión. La absorción de la radiación THz, varía en las distintas zonas de la hoja según el contenido de agua de las mismas, siendo esta mayor en los nervios centrales, es decir, se absorbe o refleja más en esta zona por tener un mayor contenido de agua. Al mismo tiempo, al superponer dos de estas, la absorción es mayor en las zonas superpuestas con unos valores de entre -25 y -30 dB. También se observa en las zonas con metal superpuesto este incremento de nivel a valores más negativos, un azul más intenso. Por último, donde tiene el hueco no refleja nada con valores cercanos al 0 dB.

A parte de esto, también se utiliza en el sector agroalimentario puesto que existe una gran demanda de controles de seguridad y de calidad y es necesario cumplir cada vez unas normas más estrictas que deben verificar y garantizar que los productos cumplan dichos requisitos.

También en este sector se están desarrollando cámaras de imagen mediante THz para detectar objetos no deseados en productos alimenticios, pudiendo detectar madera, metal, plástico y vidrio como se aprecia en la figura 12:

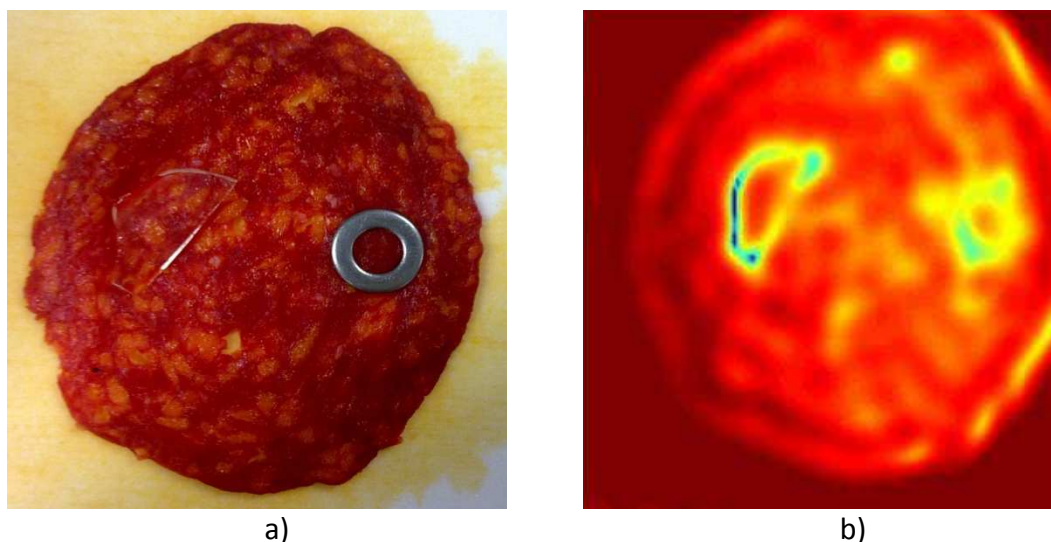


Figura 12: a) Imagen en el visible de una rodaja de chorizo con pequeños trozos de vidrio y metal adheridos. b) Imagen en THz. Se observa como el vidrio y el metal reflejan más, por ello su cambio de color a más azulón.

También se están desarrollando sistemas de recuento bacteriano y de detección de bacterias en productos cárnicos basándose en las mediciones en el rango de los THz. Además de esto, en la industria farmacéutica se detectan polimorfismos indetectables mediante otras técnicas y controlan la calidad del revestimiento de las pastillas de medicamentos.

A continuación se explica con más detenimiento la investigación sobre el contenido de agua en las hojas y la evaluación no destructiva de los corchos.

2.2.2.1 Contenido de agua en las hojas

La viticultura es el cultivo sistemático de la vid o parra para producir vino. Los tejidos biológicos junto con el agua tienen un gran coeficiente de absorción, alrededor de 10^6 más en el rango de los THz que en el visible.

Esta fuerte absorción en los tejidos biológicos admite realizar medidas no invasivas del contenido de agua en las hojas de la vid, con lo cual permite monitorizar en tiempo real las necesidades que tiene de agua una planta extrapolándose a la agricultura en general. [13][14]

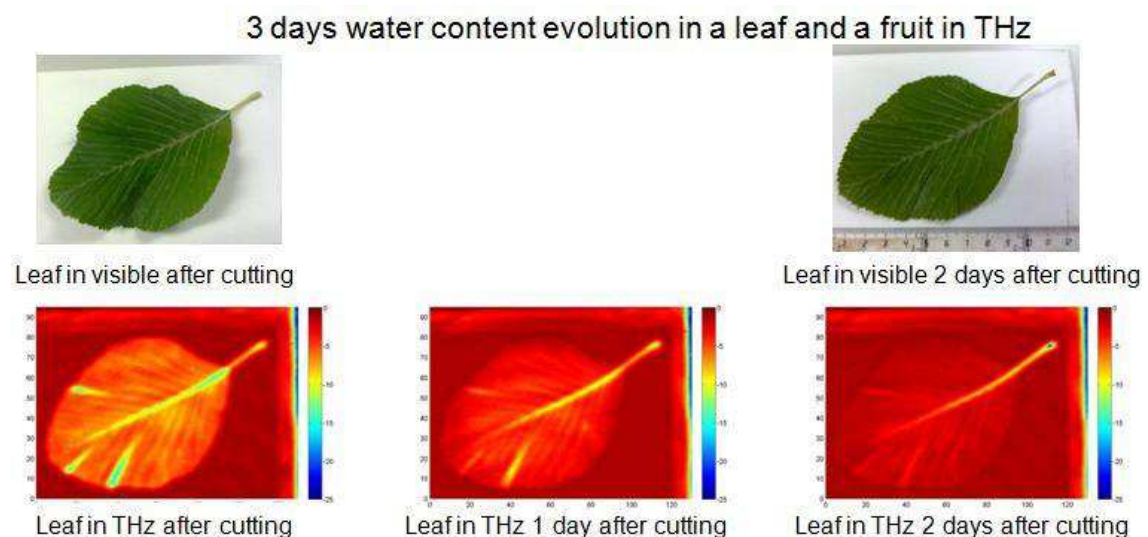


Figura 13: Imagen en THz de una hoja en transmisión en tres días distintos y su comparación con la imagen en el visible.

Como se observa en la figura 13 se tiene una hoja y sus respectivas imágenes en THz en tres días consecutivos desde que fue cortada. Como se aprecia, en la imagen tomada justamente después de cortarla tiene gran porcentaje de agua, por eso se ven más los nervios tanto el principal como los secundarios con valores comprendidos entre -10 y -20 dB. La hoja en sí tiene unos valores de entre -5 y -10 dB. Estos valores son debidos a la absorción del agua en este rango.

La siguiente imagen se trata de la misma hoja pero un día después de cortarla; se observa como empieza a secarse, comienza a perder agua y no absorbe tanto, presentando valores de entre -2 y -7 dB. Los nervios han perdido absorción y como se aprecia solo el nervio principal y otro secundario muestran valores de unos -10 dB aproximadamente.

Por último, se obtiene una imagen dos días después de cortarse. Se distingue claramente como se ha perdido bastante agua con respecto a la primera imagen, la realizada justo después de cortase. Se aprecia que los niveles de absorción han bajado considerablemente en comparación a la primera imagen debido al secado de la hoja. Sin embargo, cabe resaltar que en la imagen del visible no se aprecia el cambio.

2.2.2.2 Evaluación no destructiva de corchos

Los tapones de corcho natural, debido a su estructura celular y baja humedad, permiten que las radiaciones en THz y las ondas milimétricas sean perfectos candidatos para una evaluación no destructiva tanto de la superficie del corcho como de su interior, estudiando su comportamiento sin modificar la estructura del corcho, bien sea en parámetros de transmisión o de reflexión. [15]

La calidad de un corcho varía en función de la cantidad y del tamaño de huecos, ranuras y defectos que contenga. Existen determinados métodos para la evaluación no destructiva del corcho como el control visual de defectos y roturas mediante técnicas especializadas o mediante sistemas visuales. De la misma manera con métodos de análisis químicos en los que se determinan la presencia de tricloroanisoles, también conocidos como TCA y con tomografías de rayos X.

El TCA es una sustancia que resulta de la degradación de los triclorofenoles (TPA) que a su vez provienen de la unión de los fenoles del corcho con las partículas de cloro disueltas en el aire. Se cree que es la primera causa culpable del sabor a corcho del vino. [16]

El compuesto 2, 4, 6 –TCA se asocia a la contaminación de muchas comidas y bebidas, por ejemplo, el sabor a sucio en agua potable, vino, arroz, pasas... Además es el responsable del olor y sabor a corcho del vino, bien porque el corcho no fue tratado adecuadamente durante su fabricación o por que la botella no se ha mantenido en unas condiciones adecuadas de temperatura y de humedad. [17]

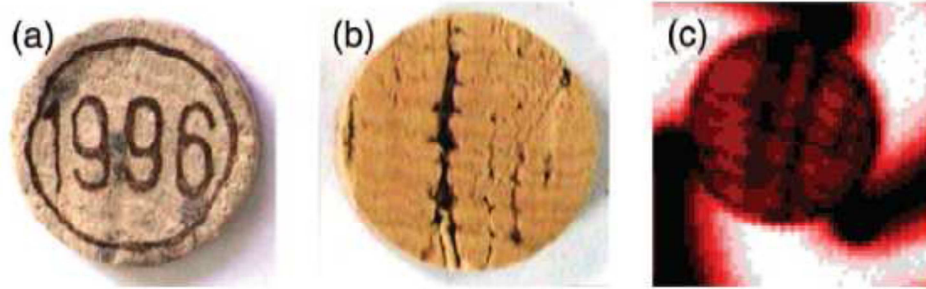


Figura 14: La imagen (a) corresponde a una imagen visible de la parte frontal del corcho, la imagen (b) es una imagen visible de la parte trasera del corcho, la parte en contacto con el vino y la imagen (c) es la imagen THz de la los primeros 4.35 mm de la parte frontal del corcho.

Por otro lado, y haciendo referencia a la detección de defectos en el corcho, (figura 14) se puede concluir que la imagen en el visible de la parte frontal puede ser engañosa debido a que no muestra las cavidades internas donde también puede tener defectos. Sin embargo, al realizar la imagen en THz se muestran tres pequeños huecos en los primeros 4.35 mm. Este valor se considera el límite para una correcta visualización en la imagen en THz. Estos huecos van aumentando de tamaño hasta hacerse visibles en la parte posterior del corcho.

Por tanto, la imagen en THz permite examinar el corcho y visualizar roturas y huecos inapreciables en el rango visible.

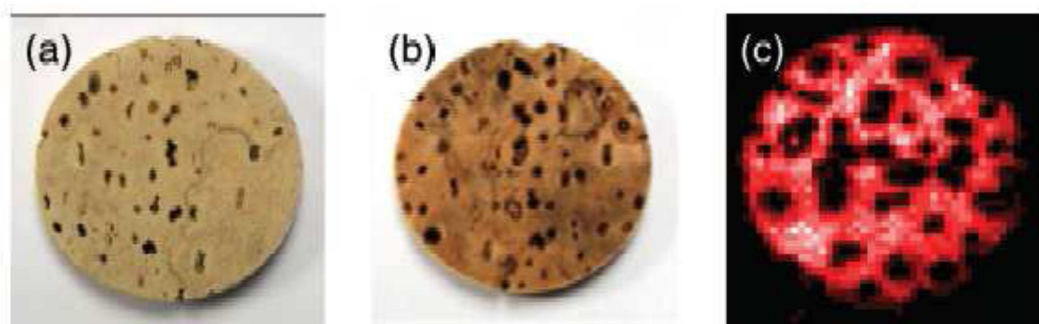


Figura 15: La imagen (a) corresponde a una imagen visible de la parte frontal del corcho, la imagen (b) es una imagen visible de la parte trasera del corcho y la imagen (c) es la imagen THz de la los primeros 4.02 mm de la parte frontal del corcho.

Las ondas de THz interactúan de forma diferente en función de las grietas y agujeros que se encuentren en su camino, por eso se crean contrastes en las imágenes en THz debido a como inciden lo que permite diferenciar las grietas y agujeros por su cambio de color al visualizar la imagen.

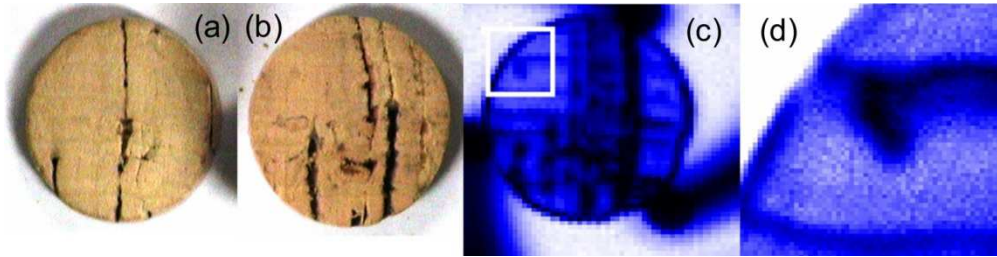


Figura 16: La imagen (a) y (b) parte frontal y posterior de la muestra en el visible. Imágenes en THz, (c) y (d) imágenes donde se muestran las fisuras. La imagen (d) se obtiene con una resolución de 100 μm .

La figura 16 muestra otro ejemplo de fisuras y huecos en corchos de vino. En la figura 16.d, imagen aumentada de la 16.c, se observa como aparece una gran fisura sin aparecer en las otras dos imágenes del visible.

En resumen, las imágenes en THz permiten distinguir huecos y defectos del corcho tanto en la superficie como en su interior sin cambiar ni destruir la estructura del corcho.

2.2.3 Campo de la biomedicina

En biomedicina, se está trabajando en diferentes áreas:

- La caracterización de las propiedades espectrales de emisión de los diferentes tejidos, órganos, sustancias y materiales.
- Desarrollando tecnología para el diseño, fabricación y caracterización de cámaras de imagen adaptadas a las necesidades y particularidades de las aplicaciones médicas.
- Desarrollando técnicas de procesamiento de imagen, que se adaptan a las imágenes tomadas.

Estas técnicas permiten, por ejemplo, delimitar con mucha mayor exactitud con las técnicas actuales el contorno de un cáncer de piel, como se explica a continuación.

También se explica con detenimiento la salud dental y la dermatología.

2.2.3.1 Oncología

En esta rama de la medicina se ha conseguido detectar células cancerosas o enfermas a través de la comparación de imágenes en THz y de los análisis realizados. La visión de las células sanas y de las cancerosas es diferente en THz con lo que se

obtiene contraste entre estos tipos de células en las imágenes en THz. La comparación muestra grandes coincidencias entre las imágenes y las células cancerosas. También, el diagnóstico puede requerir imágenes con mayor resolución, aproximadamente varias decenas de micrómetros, lográndose con técnicas de imagen de campo próximo.

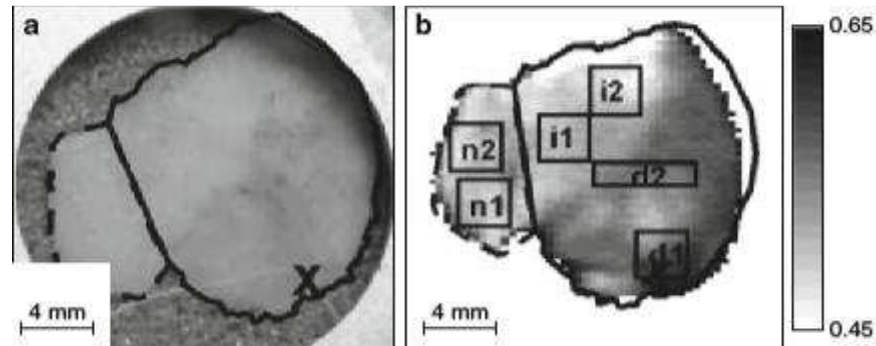


Figura 17: a) Imagen visible de tejido con cáncer de piel. La línea continua representa la región de tejido enfermo y la línea discontinua la región con tejido sano. b) Imagen en THz medida con un espectrómetro en el dominio del tiempo en modo de reflexión, (n1, n2 tejido sano: i1, i2 tejido inflamado: d1, d2 tejido enfermo). A simple vista se observan las diferencias entre un tejido y otro.

Se estima que más del 85% de las células cancerosas se originan en el epitelio. Extirpar parte del tejido del cuerpo y examinarlo en el microscopio nos permite diagnosticar el cáncer. [18][19]

No obstante, la tecnología de los THz ha mejorado la calidad de las biopsias convencionales, identificando las zonas cancerosas que deben extirparse, reduciendo el número de procedimientos para ello y facilitando el diagnóstico del tipo de cáncer y su avance.

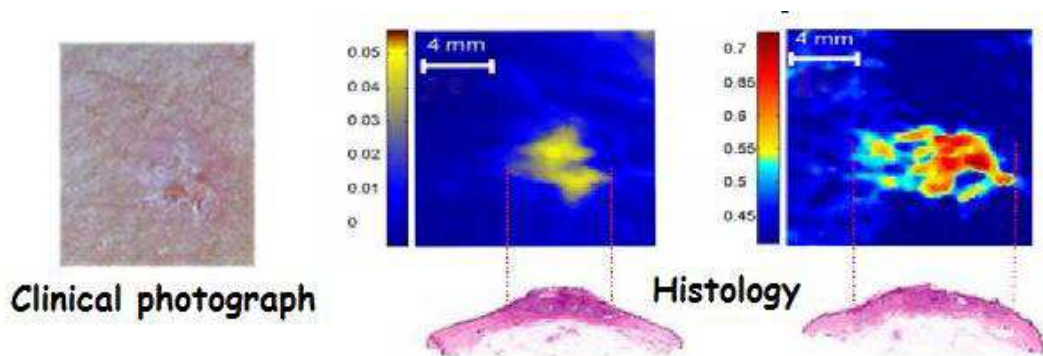


Figura 18: Imagen THz de un cáncer de piel en la superficie y en el interior del tejido.

Debido a la capacidad de penetración de la radiación de THz en los tejidos, que pueden ser de varios milímetros, la imagen en THz permite mostrar más detalles en una imagen con metástasis que la misma en el visible.

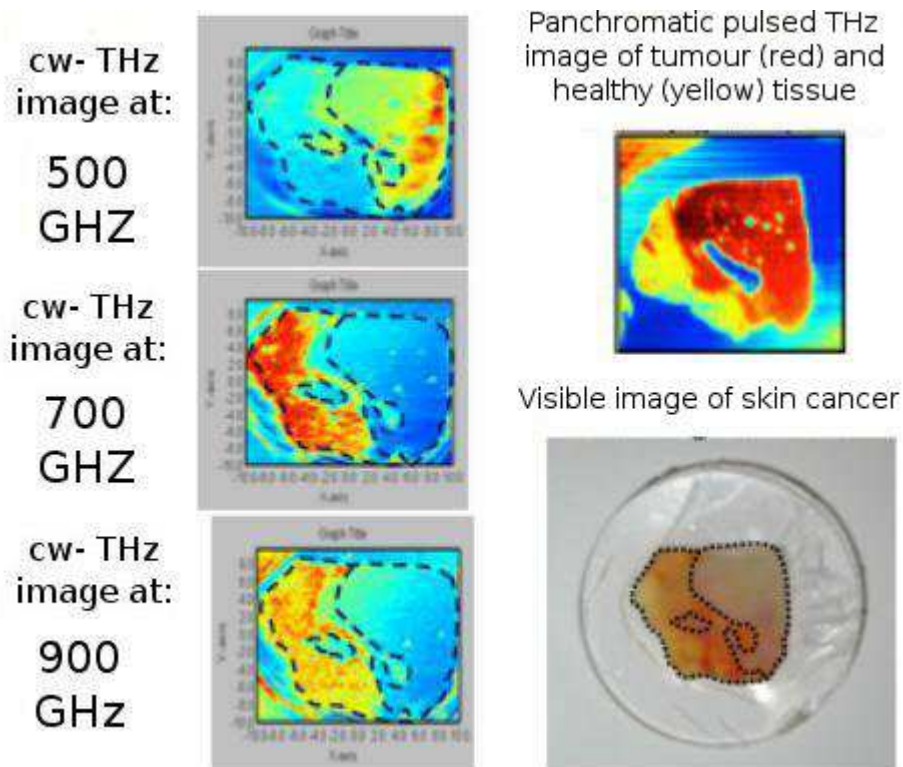


Figura 19: Imagen en el visible e imágenes en 0.5 THz, 0.7 THz y 0.9 THz de un tumor. Se distingue la zona sana de la cancerígena.

Otro ejemplo de aplicación sería el estudio de muestras histopatológicas mediante THz, aquellas muestras sometidas a ciertas operaciones como la obtención del material histológico, la deshidratación, la infiltración... y estudiadas mediante microscopio, en este caso mediante un microscopio óptico. Para esto se escoge un hígado humano con metástasis y una laringe de un cerdo recortadas en rebanadas, suficientemente gruesas para que la radiación THz pueda penetrar.

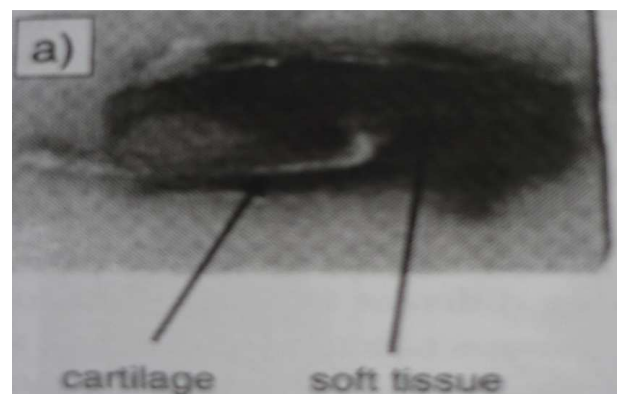


Figura 20: (a) imagen óptica de una muestra de la laringe de un cerdo donde se distinguen los distintos tejidos.

La laringe contiene regiones de cartílago y regiones de tejidos blandos. Estos pueden diferenciarse según en qué frecuencia se hayan recogido las imágenes. En la figura 21 se muestra la imagen en transmisión a una frecuencia de 1.0 a 1.5 THz. Como se observa, las zonas oscuras se corresponden con una baja transmisión y no se diferencian los tejidos al absorber la misma radiación. En cambio si se escoge la frecuencia de obtención de la imagen entre los 0.2 y los 0.5 THz si se diferencian.

Así que, las zonas oscuras se corresponden con las regiones de los cartílagos debido a su mayor absorción a esta frecuencia (figura 22).

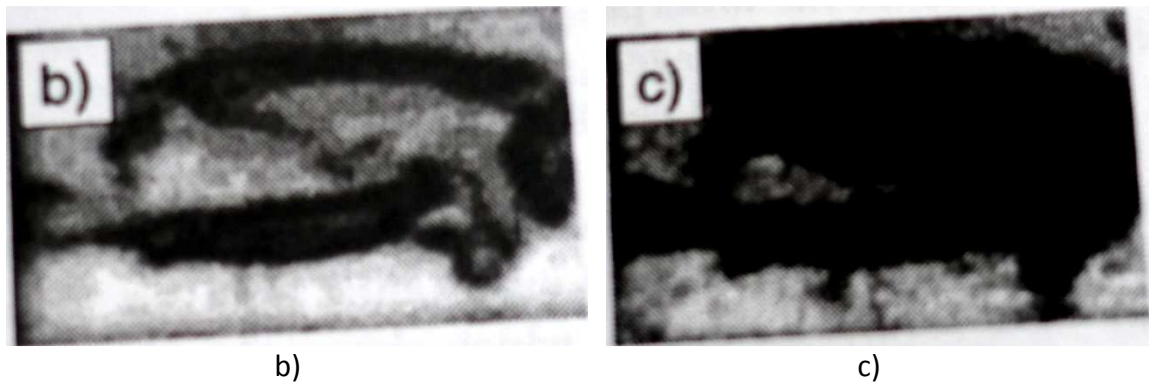


Figura 21: (b) Imagen en transmisión de una muestra recogida en frecuencias de entre 1.0 y 1.5 THz. (c) Imagen en transmisión de una muestra recogida en frecuencias de entre 0.2 y 0.5 THz.

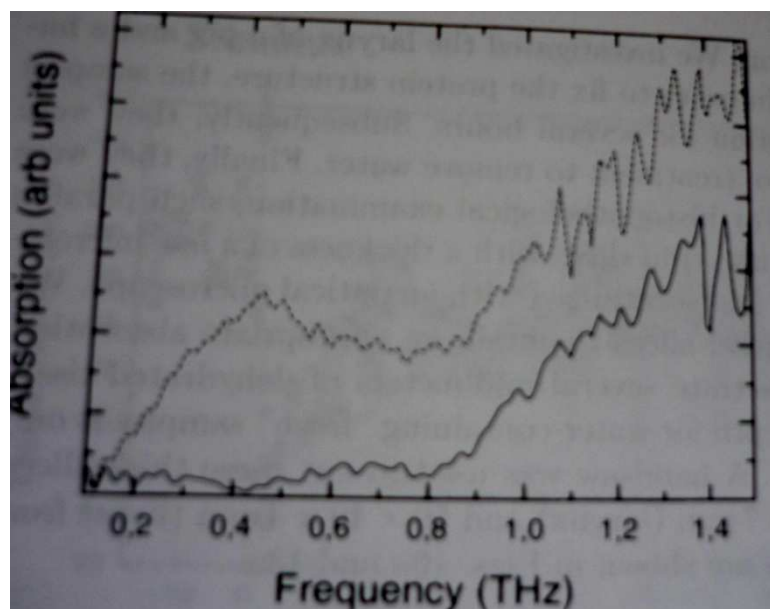


Figura 22: Comparación entre la absorción del tejido blando (línea continua) y la absorción del cartílago (línea discontinua).

Se observa que la absorción del cartílago se incrementa en 0.45 THz un factor de 20 respecto la absorción del tejido blando. [20]

2.2.3.2 Salud dental

Las caries forman parte de la salud dental. Estas se forman debido a la destrucción localizada de la capa más externa del diente, llamada Enamel o esmalte dental. La placa bacteriana genera ácidos que se depositan y se adhieren al diente causando la desmineralización, proceso en el que el diente se erosiona.

Las caries se producen por una lesión en el esmalte dental extendiéndose hasta la dentina y a la pulpa dentaria, más conocida como nervio, produciéndose así la inflamación llamada pulpitis y posteriormente la necrosis o también llamada muerte pulpar. [21]

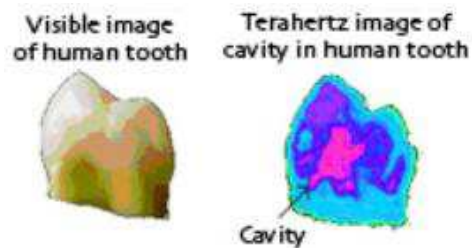


Figura 23: Imagen de un diente humano en el visible e imagen del mismo diente en THz donde se observan las cavidades en morado.

La no uniformidad de la superficie del diente convierte la detección de caries en una tarea complicada debido a que el primer rastro de caries es una mancha blanca sin existir todavía la cavidad propiamente dicha.

Para detectar las caries se utilizan los rayos X, pero solo se obtiene una solución favorable si se encuentra en un estado avanzado. Debido a la naturaleza ionizante de los rayos X este método no es óptimo para revisiones regulares puesto que pueden dañar a la persona. [22]

Si las caries se detectan a tiempo, es posible restablecer el proceso de desmineralización y sin necesidad de agujerear, cerrar la fisura para su remineralización.

Por lo tanto las imágenes de THz permiten distinguir entre los diferentes tipos de tejido que forman el diente humano y detectar las erosiones, por muy pequeñas que sean, en la capa enamel.

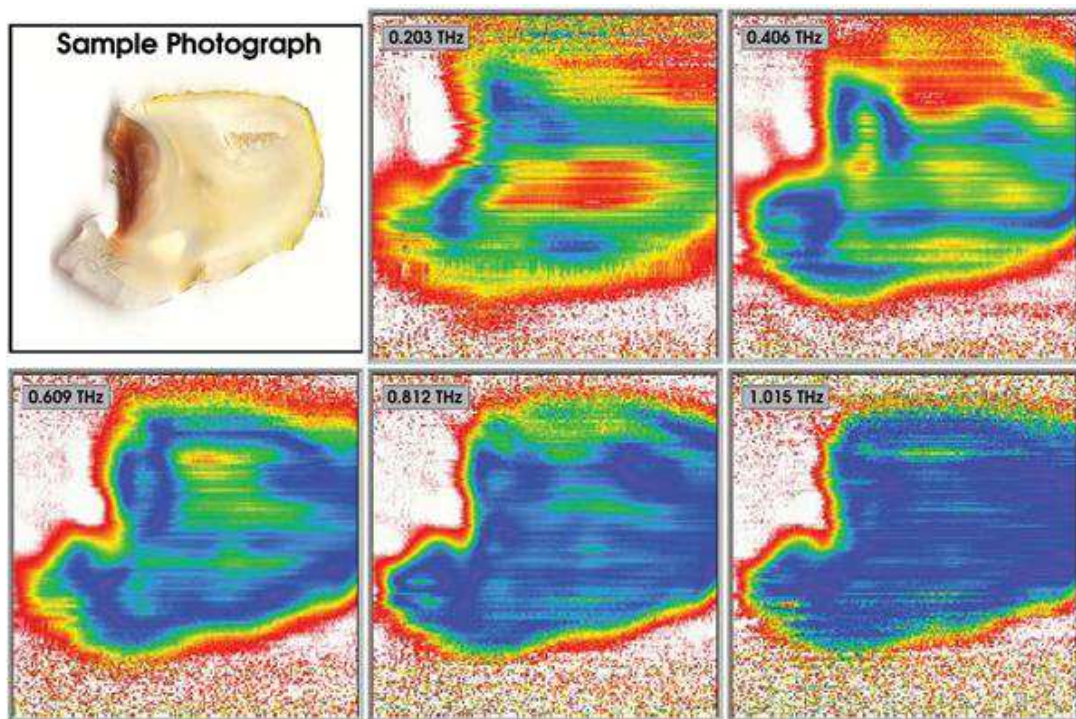


Figura 24: La parte superior izquierda es una imagen de muestra de un diente en rodajas y las otras imágenes corresponden a aquellas conseguidas en las frecuencias de THz que se encuentran en su correspondiente recuadro.

Como se observa en la figura 24 se muestra la rodaja de un diente en el visible y en sucesivas frecuencias de THz. Conforme va aumentando la frecuencia en THz se aprecia que la potencia que emite el diente en esos THz se ajusta a un valor parecido, en este caso en 1.015 THz aparece un diente con su interior azul mientras que en 0.203 THz hay varios valores de potencia distintos.

2.2.3.3 Dermatología

El buen estado de la piel está relacionado con la capa más externa, la epidermis dividida en otras tres zonas diferenciadas: estrato córneo, queratinocitos y capa basal siendo el estrato córneo la más externa de todas.

El contenido de agua en el estrato córneo influye en la permeabilidad y en la elasticidad de la piel. Por lo tanto, la función de la gran mayoría de los productos para el cuidado de la piel es incrementar la retención de agua de esta capa para mejorar su apariencia.

Puesto que la piel contiene grandes cantidades de agua tanto en su superficie como en los primeros milímetros se puede utilizar la tecnología de THz para detectar el

contenido en agua, realizando estudios parecidos a los realizados en las hojas de las plantas. Para ello se cuantifica el grado de hidratación del estrato córneo y así caracterizar y comparar la efectividad de los diferentes productos de la industria cosmética. [23]

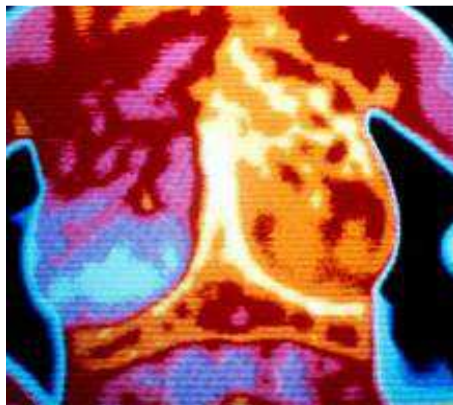


Figura 25: Imagen en la que se muestra el cuerpo humano con diferente absorción en función de si está cubierto por ropa o si no o de si se ha aplicado algún tipo de cosmético.

En la figura 25 se muestra como la hidratación de la piel varía en función de las zonas del cuerpo. Se observa cómo parte del cuerpo se encuentra recubierta por una tela o se ha aplicado algún tipo de cosmético hidratante, mientras que en la otra o está desnuda o se ha aplicado en menor medida. Se observa la variación del color desde un fuerte granate a un azul cielo pasando por un amarillo anaranjado. Esto es debido a la cantidad de agua que tiene el estrato córneo.

2.2.4 Otros campos de aplicación

2.2.4.1 Estructura molecular

Para investigar sobre el estado cristalino de los fármacos, es decir, estudiar cómo se encuentran ordenadas las partículas que lo forman se utiliza la espectroscopia en THz para las vibraciones intramoleculares e intermoleculares de las diferentes especies químicas. Intramoleculares serían aquellas que hacen referencia al interior de una sola molécula y las intermoleculares a aquellas entre moléculas distintas.

Las imágenes de THz en fármacos permiten descubrir la estructura 3D de la proteína y cómo se caracteriza. También, esta técnica es muy sensible a la hibridación del DNA y otras interacciones. La hibridación es el proceso por el cual se combinan dos cadenas de ácidos nucleicos antiparalelas con secuencias de bases complementarias.

Esta combinación da como resultado una única molécula de doble cadena con estructura de doble hélice donde las bases nitrogenadas quedan ocultas en el interior.

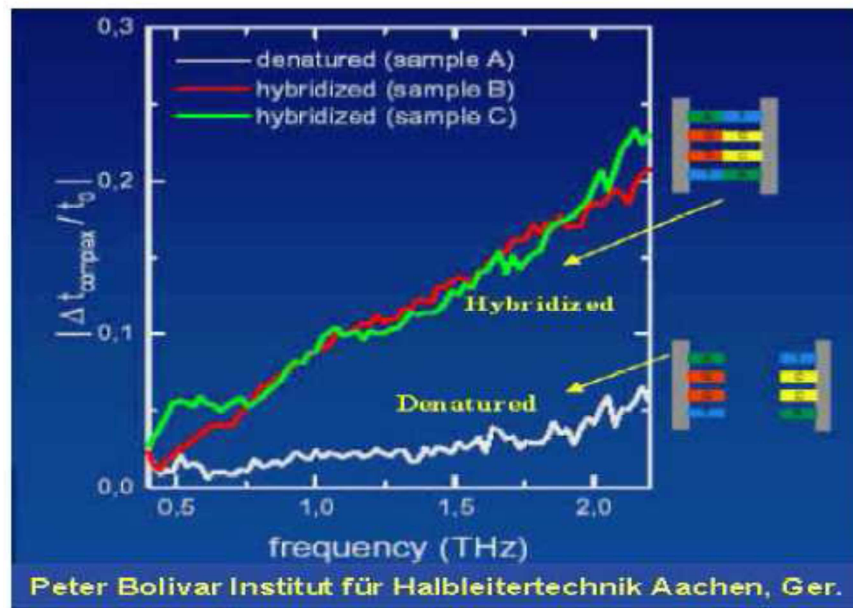


Figura 26: Se muestran las diferencias de absorción del DNA cuando sus cadenas están hibridadas o desnaturalizadas.

La espectroscopia THz permite identificar las distintas formas cristalinas de las moléculas de los medicamentos. Estas muestran diferentes características que permiten calcular la eficacia terapéutica del medicamento.

Como ya se ha hablado con anterioridad, los THz pueden diferenciar entre diferentes formas de hidratación. La lactosa, uno de los excipientes más usados en la industria farmacéutica, forma como mínimo tres hidratos diferentes siendo los más usados el α -mono hidrato, el α -anhidrato y el β -anhidrato. Estos pueden ser identificados mediante espectroscopia THz para análisis cuantitativos y cualitativos. [24]

2.2.4.2 Cambios en el estado de la materia

Según el estado en que se encuentre la materia: líquido, sólido o semisólido, la radiación de las ondas de THz serán absorbidas o atenuadas de forma diferente. Cuando la materia se encuentra en estado líquido, la radiación se absorbe o atenúa en mayor cantidad que en estado sólido o semisólido.

La mayor parte de la absorción se debe al movimiento de las moléculas, en este caso rotacional. Estos movimientos ocurren cuando la materia se encuentra en estado líquido y debido a una menor transparencia a la radiación THz absorbe o atenúa menos, mientras que en el estado sólido y semisólido, al tener las moléculas más juntas y con movimientos limitados es más fácil que la radiación la traspase y sea absorbida o atenuada.

Estas diferencias de atenuación se pueden monitorizar para detectar el estado en que se encuentra la muestra durante el proceso de cambio de fase, por ejemplo, un adhesivo durante el proceso de secado.

Muchos adhesivos son altamente polares, proporcionando un fuerte contraste entre la absorción de las moléculas líquidas con rotación libre y las moléculas sólidas y semisólidas endurecidas con rotación limitada. [25]

Esta propiedad de absorber de forma diferente según el estado de la materia, tiene varias aplicaciones prácticas:

- En pegamentos, haciendo referencia a su endurecimiento o secado (láminas de plástico, láminas de madera, sellador de silicona...).
- Cambios de estado, de agua a hielo y viceversa, importante para el control de comida congelada.
- Control y medición de la humedad, por el contenido de agua en productos comerciales como la comida de bebés o bebidas en polvo (leche en polvo, café...).
- Monitorizar y controlar el proceso de secado de pinturas.

2.2.4.3 Imágenes de THz de sustancias en polvos

La radiación de THz penetra en muchos materiales no metálicos que son opacos en la luz visible o en otros rangos del espectro electromagnético. Un tipo de sustancias no transparentes para un gran rango espectral son los polvos, debido a su formación ya que se encuentran formados por miles de partículas. [26] [27]

Las radiaciones que penetran en estos son las de alta frecuencia, rayos X y las de baja frecuencia, ondas de radio.

A baja frecuencia, los polvos se vuelven transparentes cuando la longitud de onda es mayor que el tamaño del grano del polvo.

El tamaño del grano de muchos polvos, por ejemplo, en la comida industrial está por debajo del rango milimétrico, por lo que el rango de los THz es la radiación

con la longitud de onda más pequeña disponible para ver imágenes de estas sustancias.

Los rayos X, se pueden usar para ver imágenes de polvos y detectar objetos metálicos en ellas, pero no son capaces de formar imágenes de objetos hechos de otros materiales como plásticos en polvos orgánicos.

La radiación de THz tiene el potencial suficiente para detectar los objetos presentes en polvos. Esto es imprescindible para los controles de calidad de la industria alimentaria. Las muestras de polvo se disuelven para reducir el tamaño de los huecos entre las partículas del polvo y conseguir una distribución homogénea. Además cabe destacar una vez más la naturaleza no ionizante de esta radiación con la seguridad que esto conlleva para el consumidor.

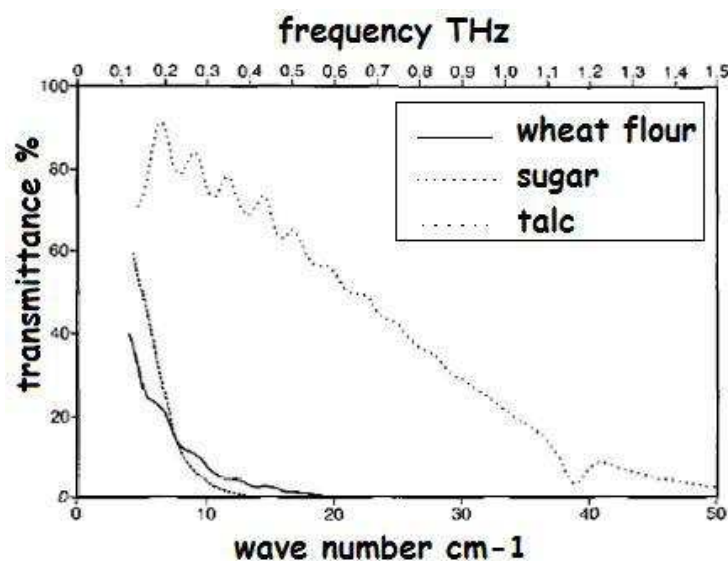


Figura 27: Espectro THz de los polvos seleccionados: harina de trigo, azúcar y talco.

Como se observa en la figura 27, las partículas de talco son atravesadas por ondas desde 0.1 THz a 1.5 THz en mayor o en menor medida mientras que las partículas de azúcar solo desde 0.1 THz hasta 0.4 THz y las de harina desde 0.1 THz hasta 0.6 THz siendo para el resto de frecuencias opacas. Esto quiere decir que solo pueden ser usados para formar imágenes y detectar su presencia en estos rangos frecuenciales.

Los polvos con menor tamaño de grano transmiten mejor a alta frecuencia y en gran ancho espectral como por ejemplo, la harina de trigo que transmite desde 0.1 THz hasta 1 THz.

La transmisión espectral depende de las propiedades del material, del tamaño de los granos y de los espacios libres entre los mismos. Además, también afecta la

forma del grano y los posibles contaminantes, de los cuales el agua tiene gran importancia porque absorbe la radiación THz y es abundante en la atmósfera.

	Frecuencia	Tamaño grano
Talco	0.1-1.2 THz	20 μm
Azúcar	0.1-0.4 THz	300 μm
Harina de trigo	0.1-0.6 THz	50 μm

Figura 28: Tabla de los tamaños de grano de las diferentes muestras.

En resumen, las imágenes de THz se pueden utilizar para encontrar objetos ocultos entre polvos de talco, harina de trigo y azúcar entre otros. Se pueden detectar objetos de diferentes materiales como cristal, metal, plástico... Esta tecnología ayudará en los controles de calidad en la industria alimentaria.

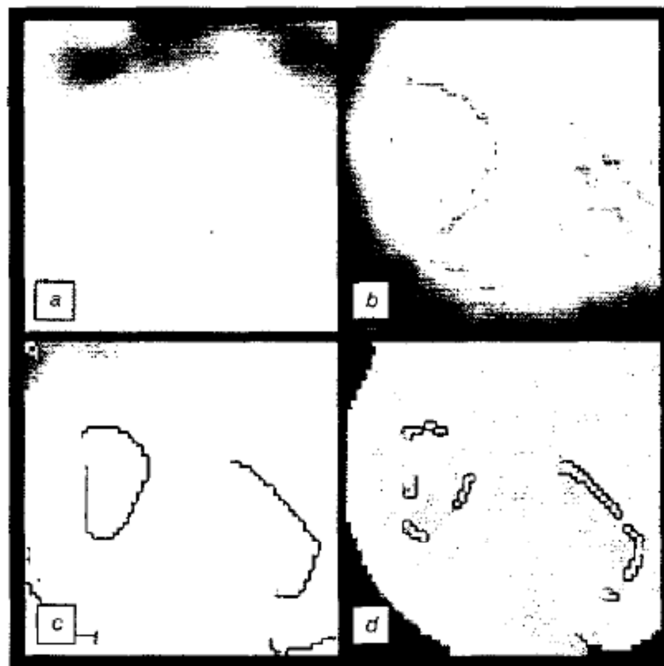


Figura 29: (izquierda) Imágenes de cáscara de huevo y (derecha) de plástico en una muestra de azúcar en polvo.

CAPÍTULO 3: TOMA DE DATOS Y DISEÑO DEL SOFTWARE.

3.1 Introducción a imágenes en 3D

Como se ha dicho con anterioridad el rango de los THz ha sido la parte del espectro electromagnético menos explotada debido a la falta de fuentes en este rango, que ha limitado considerablemente la posibilidad de profundizar en su estudio.

Dentro del Grupo de Antenas de la Universidad se trabaja en diferentes temas relacionados con los THz, y uno de ellos es el procesado de imágenes en este rango: detectando objetos indeseados en alimentos, aplicaciones en viticultura u obtención de imágenes en 3D, entre otros.

Un campo en el que cada vez es más usado es en la medicina. Esto es debido a la gran cantidad de información y aplicaciones que usan imágenes en 3D como por ejemplo en ginecología en donde se pueden realizar ecografías en 3D.

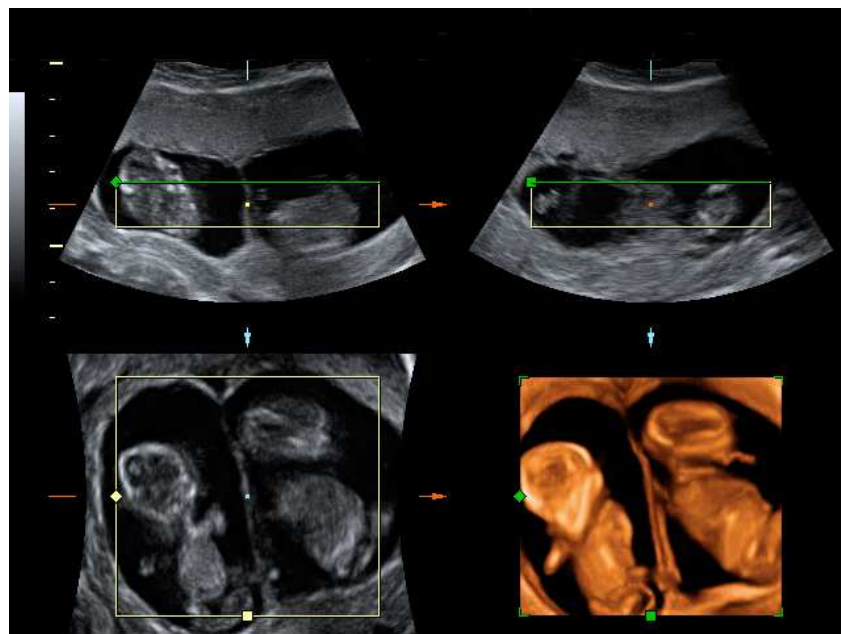


Figura 30: Imágenes de ecografías en diferentes planos en 2D y en 3D.

Actualmente ha aumentado el interés por este rango frecuencial debido, tal y como se ha explicado en el capítulo anterior, a la gran cantidad de aplicaciones que tienen. Diversos grupos de investigación trabajan en este campo, siendo el Grupo de Antenas de la UPNA grupo referencia en España y Europa.

El trabajo de investigación realizado en este Proyecto Fin de Carrera comenzó por esta rama a través de diferentes libros y artículos en los que se explicaba el procesado de las imágenes médicas en formato DICOM, Digital Imaging and Communication in Medicine. Este formato realiza la tridimensionalidad adquiriendo las imágenes en 2D, es decir, haciendo rebanadas del objeto y fusionando todas estas hasta formar la imagen en 3D. [28]

Toda imagen está representada por valores numéricos asociados a las posiciones de una red. En una imagen en dos dimensiones un valor de estos en una posición concreta sería el pixel o también llamado “picture element” mientras que en una imagen en tres dimensiones este valor se llamaría voxel o “volumen elements”. Tanto el valor del pixel como el del voxel están asociados a un valor de gris o un color. [29]

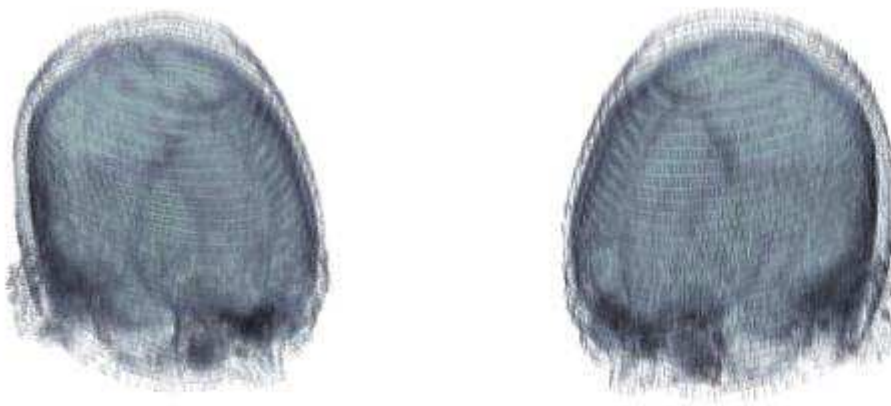
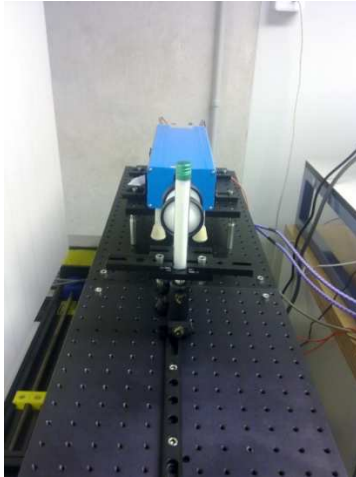


Figura 31: Imágenes en Matlab de un cráneo para una misma figura desde ángulos diferentes.

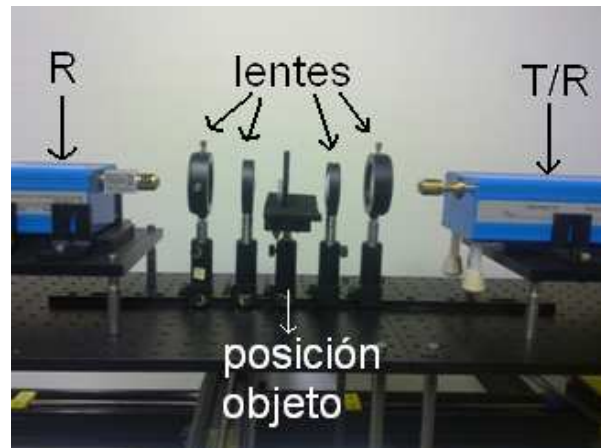
La figura 31 es la imagen demostración de una función realizada en Matlab. Como se observa en la imagen, el cráneo tiene volumen. La figura de Matlab se puede rotar y ajustar el zoom para poder visualizarlo como se quiera. [Anexo 1.1] [30]

3.2 Sistema de toma de datos en THz

Para la toma de datos en el rango de los THz se ha utilizado un analizador de redes de Agilent (E8361C) con dos cabezales externos de OML que cubren bien el de 140 GHz a 220 GHz. Uno de los módulos es sólo receptor mientras que el otro es transmisor receptor.



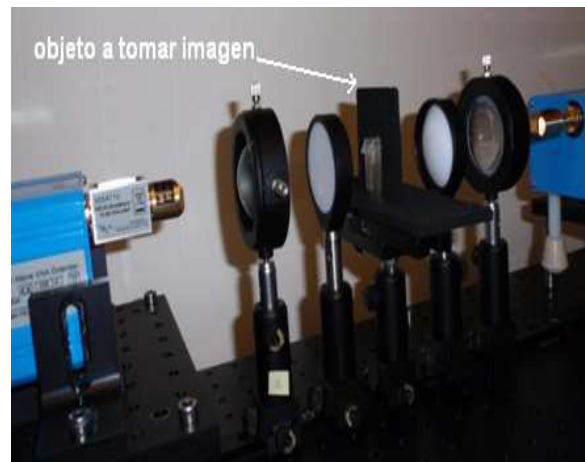
a)



b)



c)



d)

Figura 32: Imágenes obtenidas del equipo de medida utilizado. a) Sistema reflexión. b) Sistema transmisión con lentes. c) Sistema posicionamiento objeto. d) Sistema transmisión medida muestra.

Como se observa en las imágenes (figura 32), el equipo está compuesto por dos bocinas conectadas a los módulos OML y cuatro lentes, dos a cada lado de la muestra para enfocar el haz en la misma. Tanto las bocinas como las lentes se encuentran fijas a la hora de la medición. El objeto, al que se quiere tomar la imagen, es el que cambia

de posición desplazándose primero en horizontal y luego en vertical hasta realizar un barrido completo de la muestra. En función del tamaño del objeto se modifica la posición inicial y final tanto en horizontal como en vertical y en función de la resolución, la profundidad, se elige el número de puntos.

Los datos se obtienen a través de un software en Matlab preparado para realizar barridos en 2 y 3D, de forma que devuelve una matriz en la que cada fila de la misma corresponde con los datos de cada pixel de la imagen. La matriz tiene tantas columnas como puntos tenga la medida incrementándole el número en dos para mostrar la posición en la que se encuentra el pixel tratado. Las filas de la matriz serán tantas como se haya establecido en el software ya que será la multiplicación de los valores que se desplace la muestra en horizontal por los desplazados en vertical.

Los valores que ocupan esta matriz son el S_{21} (en dB) o el S_{11} (en dB) devuelto por el sistema. Cada pixel mostrará valores diferentes según lo que refleje o atenué la señal de THz en el objeto al que se le está sacando la imagen.

Este equipo de medida permite obtener datos tanto en tiempo como en frecuencia para la transmisión (S_{21}) y para la reflexión (S_{11}).

Los datos en tiempo dan información sobre profundidad, que es necesario para obtener las imágenes en 3D, por lo que se obtendrán solamente estos.

Cuando los datos se toman con el analizador midiendo en tiempo cada valor de una de las filas de la matriz corresponde al S_{11} o S_{21} en cada frecuencia. Es decir, si se toman medidas en el rango entre 140 GHz y 220 GHz con 201 puntos cada valor es el que se obtiene a una frecuencia concreta.

Si por el contrario tomamos las medidas con el analizador midiendo el S_{11} (reflexión) en tiempo cada uno de esos 201 puntos corresponde a una posición de profundidad de la señal reflejada por el objeto.

El sistema está situado en una sala limpia, un recinto especialmente diseñado para obtener bajos niveles de contaminación y con parámetros ambientales estrictamente controlados como la temperatura, la humedad, las partículas del aire...

3.3 Software de tratamiento de datos

Una vez se obtengan los datos de la imagen con el sistema descrito en el apartado anterior se explica el proceso de tratamiento que se debe dar a los datos, es decir, el esquema general del programa.

El esquema es el siguiente:

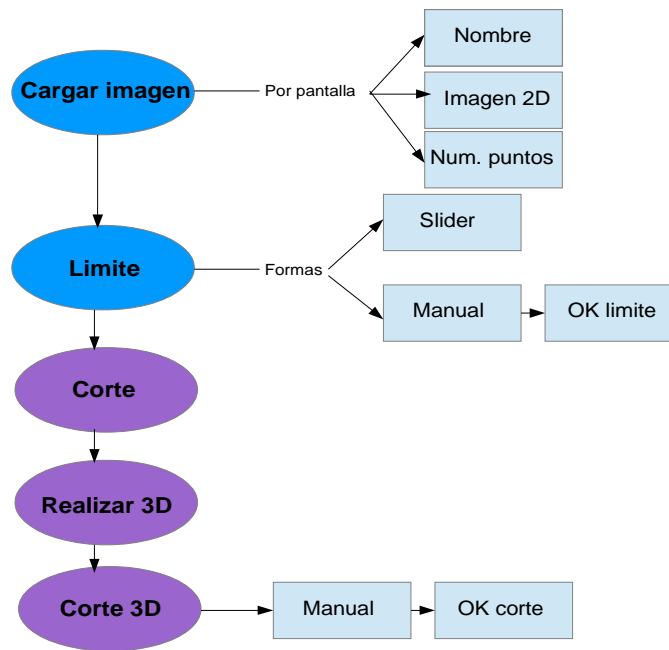


Figura 33: Diagrama del esquema general de los pasos que hay que seguir para ejecutar el programa.

Cuando se ejecuta la interfaz poniendo en Matlab “interfaz” o simplemente dándole a “play” se abre la ventana de ejecución. Tras esto se tendrán que seguir los pasos del esquema general:

1. Cargar los datos del objeto a dibujar en 3D.
2. Elegir el límite de acotación.
 - a. Manualmente.
 - b. Por medio del slider.
3. Realizar el corte en 2D.
4. Realizar el 3D.
5. Realizar el corte en el 3D.
 - a. Manualmente.

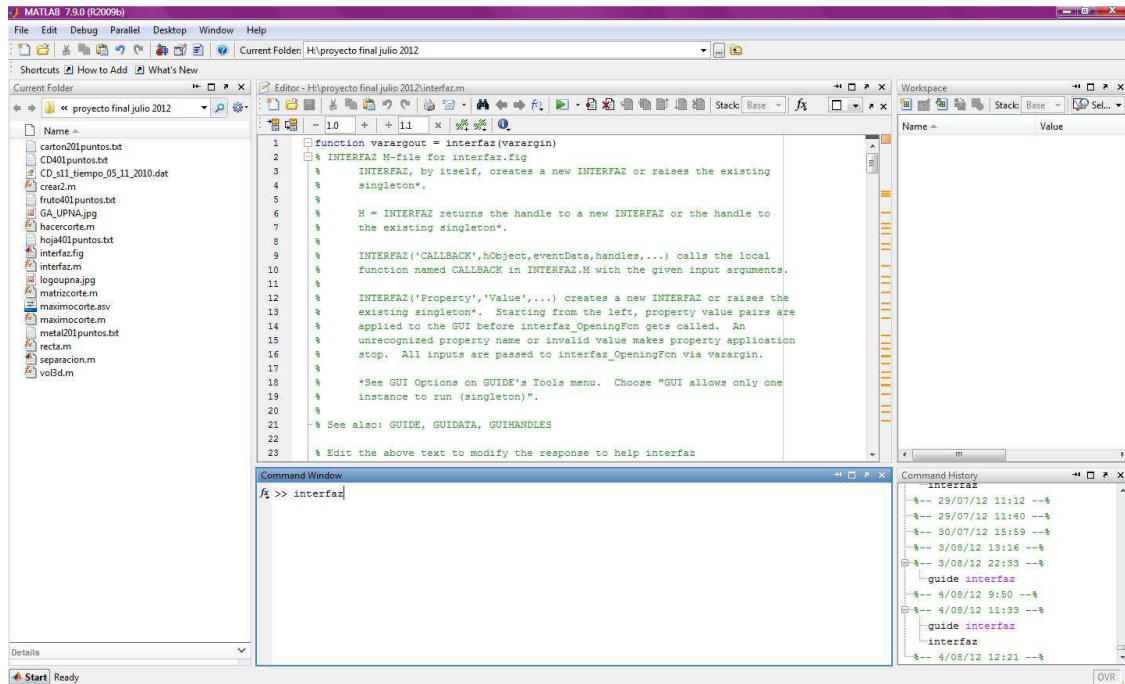


Figura 34: Imagen de la pantalla de Matlab ejecutando el programa.

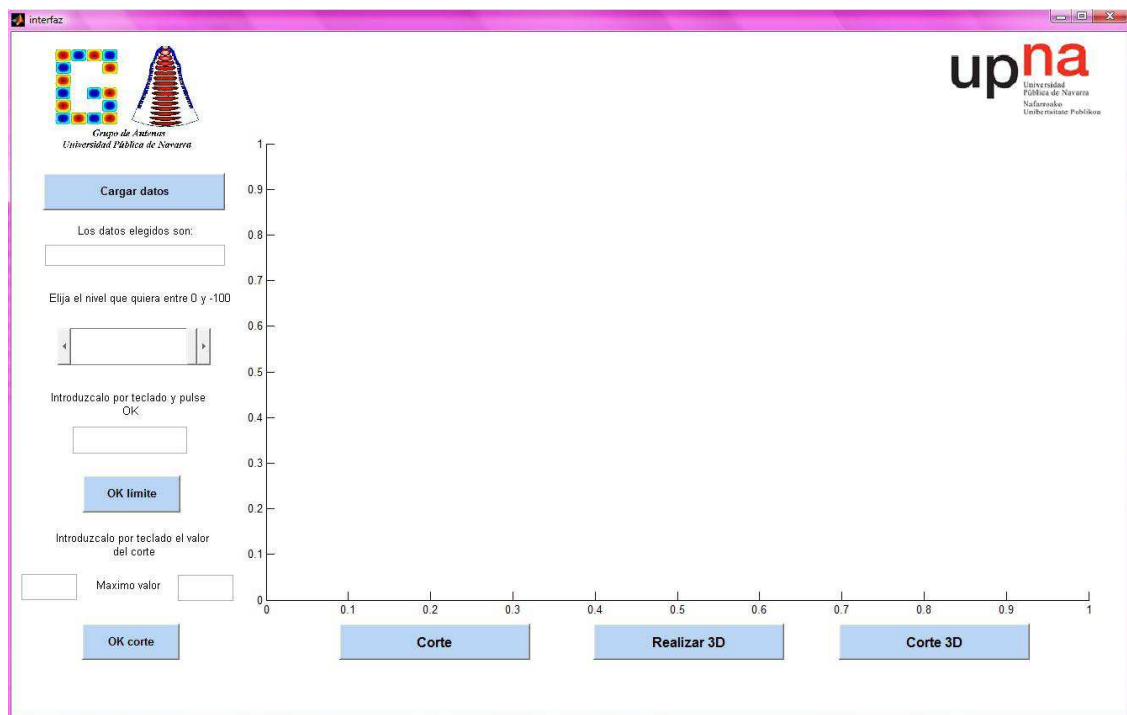


Figura 35: Imagen de la interfaz del programa.

En las esquinas superiores se encuentran los logos del Grupo de Antenas y de la Universidad Pública de Navarra. Estos logos se encuentran en dos axes diferentes y no se podrán rotar. Solo se podrá rotar una figura cuando esta sea una imagen en 3D. El

axes principal donde se van visualizando las diferentes imágenes en 2 y 3D se encuentra en medio de la interfaz ocupando más del 75% de esta. [Anexo 2]

Puesto que el axes superponía las imágenes tanto en 2D como en 3D se utilizó la instrucción “cla”, colocada en el código de cada botón que proporciona una imagen ya sea en dos como en tres dimensiones, la cual borrará por completo el axes. [31] [32]

Justo debajo del logo del Grupo de Antenas se encuentra el botón de cargar datos en el que se eligen los datos que se quieren visualizar. Tras hacer clic se abre una nueva ventana.

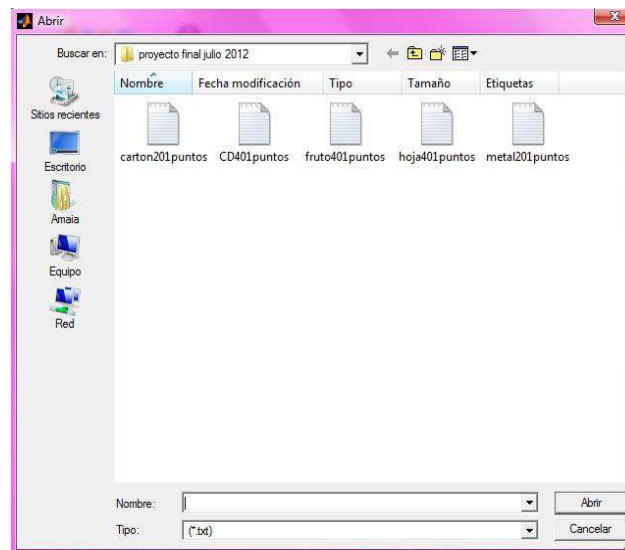


Figura 36: Ventana emergente donde se eligen los datos.

En esta se elegirán los datos y se pulsará abrir para ejecutarse. Al tratarse de un “guide” los datos de las diferentes funciones no se guardan a no ser que lo hagan en el “handles” con un nombre específico. Tras ejecutarse, se obtendrá el nombre del archivo ejecutado por pantalla y se guardaran los datos. Además se obtendrá la imagen del objeto en 2D utilizando como límite su mínimo. [Anexo 2]

Este límite fija el valor a partir del cual parte de la imagen se muestra como transparente, es decir, se quita de la imagen aquello que en la imagen 3D no sea representativo o que no deje ver el objeto a estudiar.

Para elegir el límite se moverá el slider y se obtendrá el valor por pantalla, este estará redondeado a la parte entera. El valor que sale por pantalla se guarda directamente a través de una variable global y puede ser utilizado en las diferentes funciones. Si se quiere tener mayor precisión a la hora de introducir el valor puede realizarse por teclado y a continuación pulsar el botón de “ok limite” para guardarlo. [Anexo 2]

Por último, para introducir el valor de corte para realizar el 3D se introduce el valor por teclado y se pulsa el botón “ok corte” para guardar el dato en memoria a través de otra variable local. Este valor de corte es el punto a partir del cual se representa el total de puntos tomados de la imagen. [Anexo 2]

Todo esto se realiza a través de varias instrucciones “get” y “set” para trabajar con los datos introducidos por teclado. [Anexo 2] [33]

Los otros tres botones están asociados a diferentes funciones en las que se hace el corte máximo y se limita el objeto, la realización del 3D propiamente y la realización del 3D a partir de un corte especificado.

A continuación se explica paso a paso en qué consiste cada función:

3.3.1 Realización cortes

Esta función tiene el nombre de “maximocorte”. Seguidamente se adjuntan los diagramas de bloques:

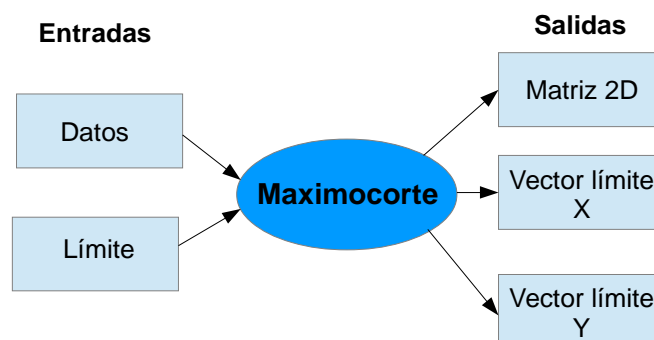


Figura 37: Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la función.

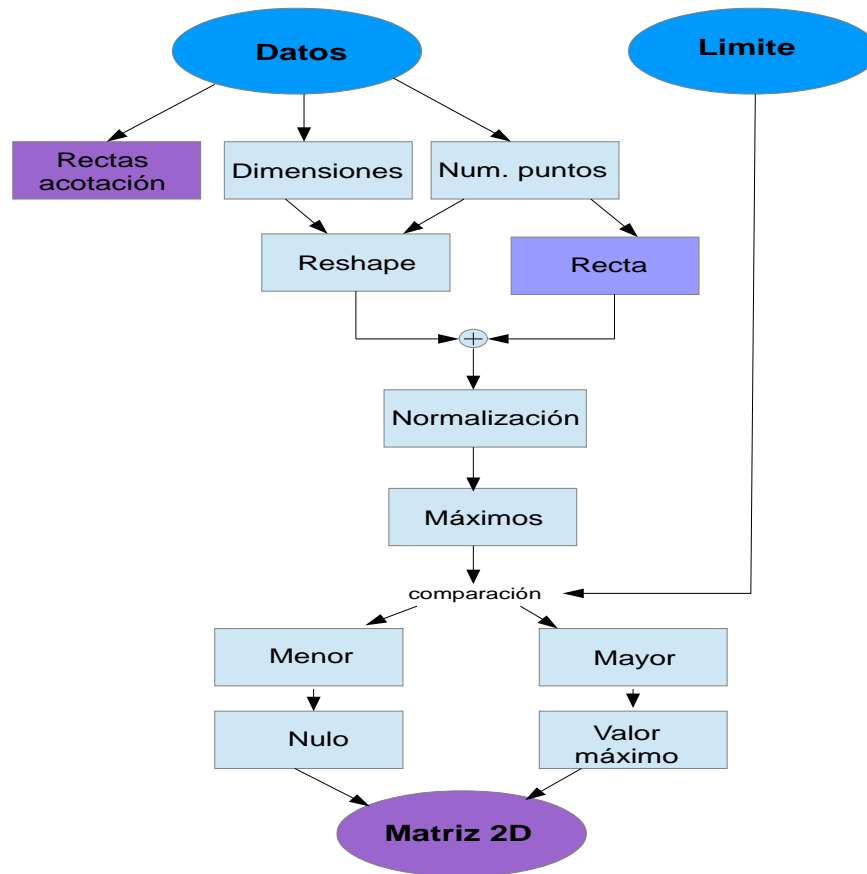


Figura 38: Diagrama de bloques de la función.

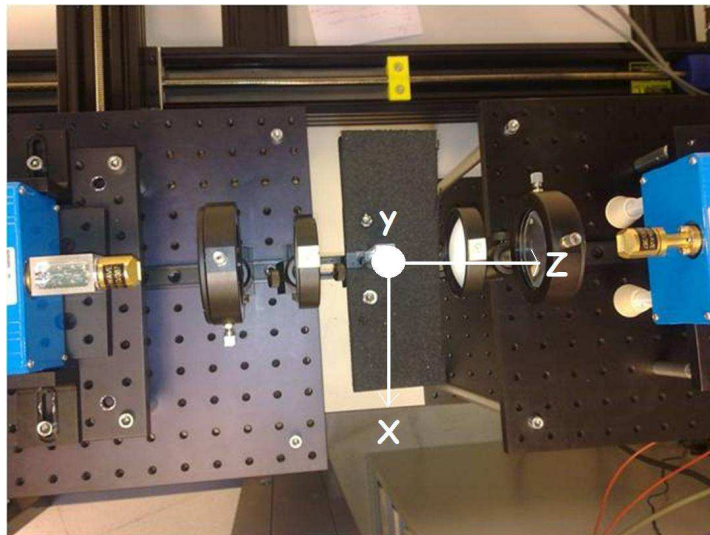


Figura 39: Sistema de toma de imágenes.

Como se observa en el diagrama de la figura 38 la función tiene dos datos de entrada, que serán los obtenidos en la matriz de la toma de imágenes con el analizador; el límite, que va a ser el valor a partir del cual todo lo que está por encima

se transforma en transparente, y los datos de la imagen. La salida de esta será una imagen en dos dimensiones y unas rectas de acotación.

En la matriz se dibujarán los máximos normalizados en cada punto, es decir, en cada punto (x, y) (figura 39) de la matriz se introduce el máximo valor de la matriz (x, y, z) siendo z de 1 hasta el número máximo de puntos. (Figuras 40 y 41) Este valor se normaliza restandole el valor máximo absoluto de la matriz. Las rectas de acotación serán vectores que van desde 0 hasta las dimensiones de la matriz. Con estos vectores se pretende ajustar los niveles de la señal para compensar las pérdidas por propagación.

1	1	-46.487041	-46.312832	-46.205719	-46.130749	-46.049072	-45.924923
2	1	-46.036877	-45.807392	-45.654259	-45.547344	-45.451916	-45.333260
3	1	-45.929317	-45.704254	-45.561848	-45.472549	-45.401306	-45.311596
4	1	-45.008579	-44.763306	-44.594547	-44.474545	-44.371479	-44.253494
5	1	-44.184444	-43.910316	-43.719910	-43.590252	-43.494682	-43.405449
6	1	-44.727329	-44.479511	-44.317890	-44.217922	-44.150341	-44.083866
7	1	-45.644348	-45.429508	-45.303730	-45.240406	-45.207249	-45.169197
8	1	-46.024727	-45.804245	-45.666737	-45.584408	-45.524467	-45.452744
9	1	-45.825542	-45.580719	-45.428131	-45.343342	-45.296268	-45.253319
10	1	-45.688675	-45.383305	-45.176342	-45.046162	-44.965904	-44.904667
11	1	-45.609188	-45.264847	-45.028194	-44.880428	-44.797428	-44.749954
12	1	-45.690987	-45.303585	-45.025181	-44.838490	-44.721684	-44.648464
13	1	-46.180721	-45.796680	-45.526554	-45.353779	-45.257076	-45.210102
14	1	-46.726974	-46.317848	-46.028900	-45.844559	-45.744499	-45.702827
15	1	-47.085163	-46.618988	-46.279823	-46.053783	-45.922749	-45.863247
16	1	-47.167412	-46.666264	-46.294300	-46.037956	-45.879696	-45.796848
17	1	-46.603207	-46.069683	-45.664013	-45.372990	-45.180084	-45.064514
18	1	-45.893799	-45.380852	-44.989536	-44.706501	-44.514908	-44.393757
19	1	-45.751629	-45.238632	-44.847538	-44.565376	-44.375816	-44.258530
20	1	-46.425972	-45.884846	-45.469559	-45.166973	-44.960815	-44.830894
21	1	-47.583549	-47.059090	-46.668598	-46.398815	-46.232834	-46.148788
22	1	-47.527199	-47.043495	-46.683456	-46.431797	-46.269169	-46.171299
23	1	-45.961861	-45.549641	-45.250645	-45.049091	-44.925056	-44.854164
24	1	-44.352020	-43.923279	-43.601406	-43.371483	-43.215187	-43.110863
25	1	-43.519173	-43.065865	-42.719028	-42.464478	-42.284866	-42.159790
26	1	-43.228107	-42.767704	-42.410015	-42.140976	-41.943584	-41.798210
27	1	-43.925942	-43.370908	-42.920073	-42.766258	-42.579445	-42.444022

Figura 40: Captura de disposición de los datos.

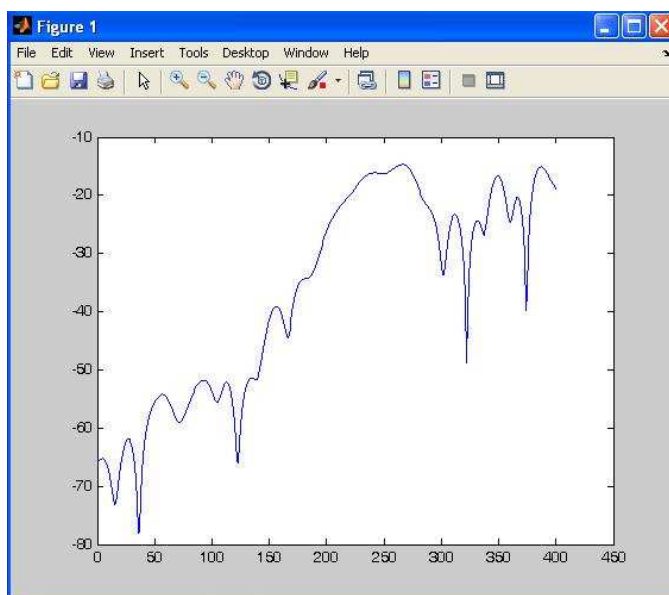


Figura 41: Imagen de un pixel frente al eje Z en tiempo. Cada punto representa un punto a cierta distancia de la bocina.

Puesto que la señal de THz se atenúa con la distancia y aumentan las pérdidas por propagación se sumará una recta conseguida a través de la función “recta” que variará en función del número de puntos que tenga los datos. La recta seguirá la siguiente fórmula:

$$L(dB) = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d$$

Siendo d la distancia en km y f la frecuencia en GHz. (3.1)

En nuestro caso f sería 220 GHz debido a que los cabezales tienen un rango de entre 140 y 220 GHz, y d sería la relación entre los milímetros y los nanosegundos determinados por el comienzo y la terminación del intervalo entre bocinas siendo en nuestro caso 1.85 ns y 2.24 ns * respectivamente. La d se calcula en función del número de puntos escogidos.

$$d = \frac{\text{extremo superior señal temporal} - \text{extremo inferior de la señal temporal}}{\text{número de puntos}}$$

siendo el extremo superior 335.77 mm y el inferior 277.31 mm. (3.2)

*datos obtenidos del propio analizador de redes

Al tener forma “logarítmica”, se sumará en los valores pequeños una cantidad muy negativa mientras que en valores grandes una cantidad muy inferior a la anterior. Con esto se quiere conseguir que los valores de reflexión tengan minimizado el efecto de las pérdidas por propagación y no se tenga en cuenta la atenuación a la hora de conseguir buscar la posición y los valores máximos, que muestran cambios de materiales en la imagen.

Como para toda recta, se necesita la pendiente y la ordenada en el origen para generar la ecuación. Para ello se promediarán varios puntos elegidos cercanos al valor máximo de la profundidad, el número de puntos. [Anexo 1.2]

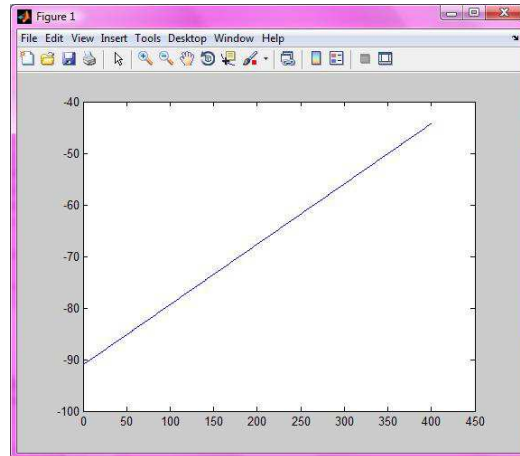
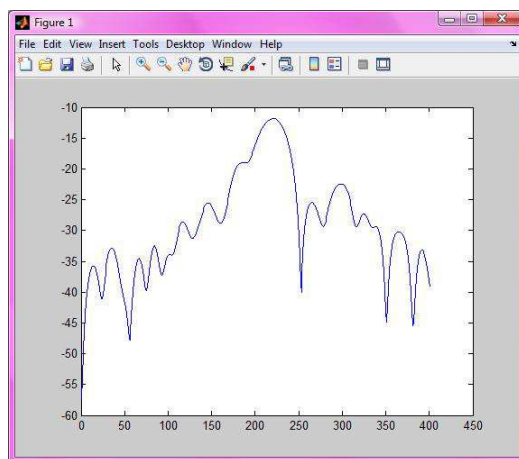
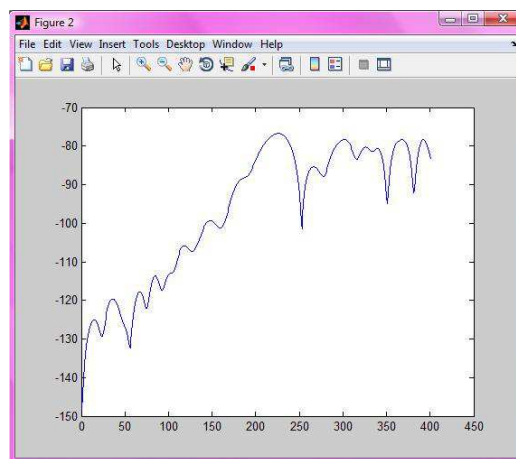


Figura 42: Imagen de recta correspondiente al punto (21,40).



a)



b)

Figura 43: a) Imagen en la posición (21,40) en todos sus puntos, en este caso 401. b) Imagen de la misma posición pero sumando la recta correspondiente.

Tras la obtención de la recta, se sumará a cada valor de la imagen su correspondiente valor de la recta compensando las pérdidas por propagación.

Para cada punto (x, y) se adquiere el valor máximo en el eje Z, de forma que se obtiene una matriz bidimensional en (x, y) con los máximos de cada pixel. Si el valor máximo en cada punto es menor al límite introducido por el usuario, teniendo en cuenta que los valores máximos son negativos, a la posición se le asignará un valor nulo mientras que si es mayor se respetará el valor correspondiente al punto. El valor nulo permite que a la hora de visualizar la imagen el punto no esté coloreado y aparezca en blanco o transparente en la imagen 3D. [Anexo 1.4]

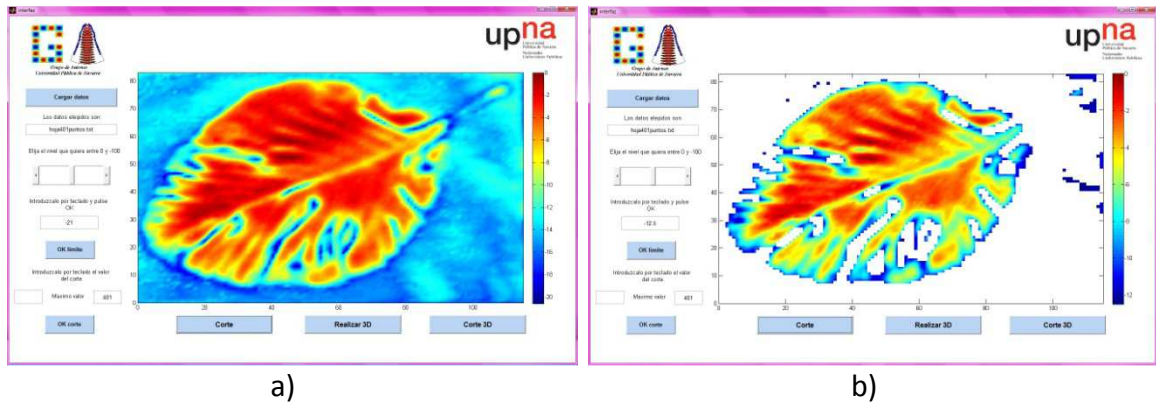


Figura 44: a) Imagen de los máximos con un límite de -21. b) Imagen con límite de -12.5.

Como se observa en la figura 44 la solución varía mucho en función del límite que se elija. La barra de color muestra los valores entre 0 cercano a un color rojizo y el mínimo con un color azulón. Se variará ese mínimo para llegar a una imagen lo más óptima posible. Si el límite es muy negativo aumentarán los valores pertenecientes al color rojo con lo cual se observará el objeto en cuestión más el aire que lo rodea, mientras que si se elige un valor de límite muy próximo a cero el objeto se eliminará.

Por lo tanto, se debe llegar a un compromiso con el valor del límite que se tome en función de cuánto del objeto se puede eliminar.

3.3.2 Realización imagen en 3D

Esta función tiene el nombre de “crear3”. A continuación se adjunta el diagrama de bloques:

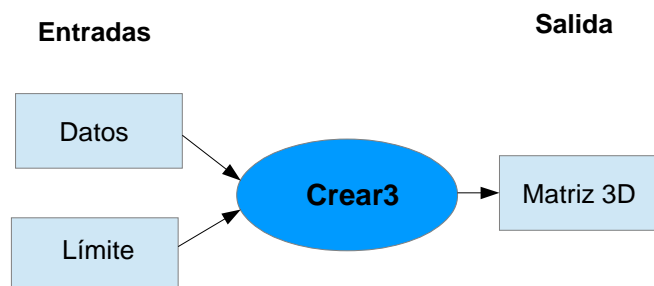


Figura 45: Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la función.

Como se observa en la figura 45, esta función tiene dos datos de entrada, el límite y los datos propiamente dichos. La salida será una matriz de tres dimensiones que será la matriz a dibujar.

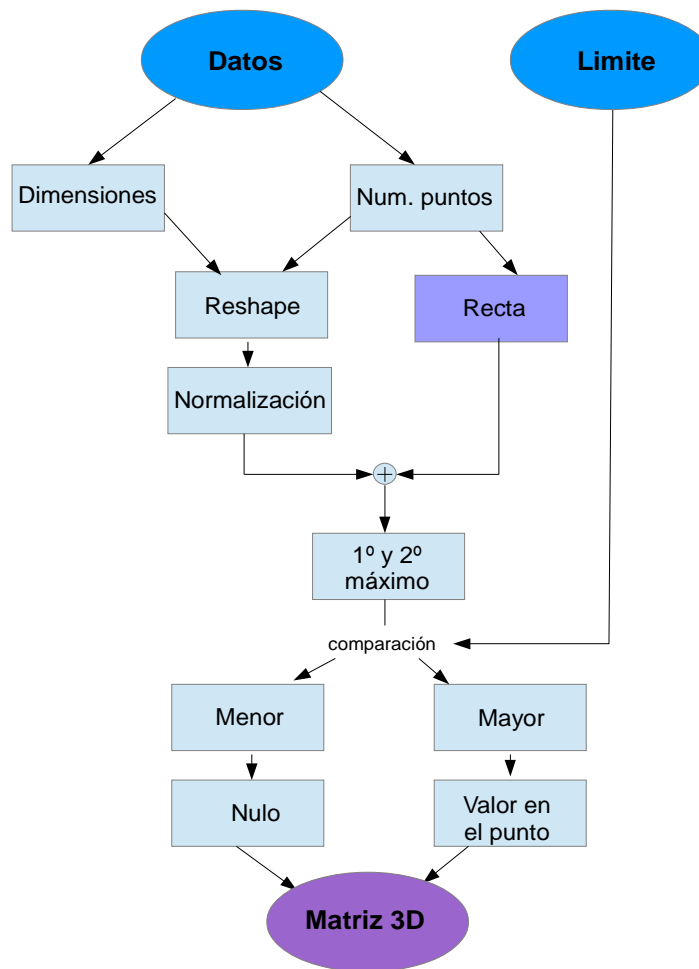


Figura 46: Diagrama de bloques de la función.

Se obtiene el tamaño y el número de puntos que tiene el eje Z, es decir, su profundidad. Al introducir una matriz en 2D se obtendrá su correspondiente matriz en 3D en función del tamaño a través del comando “reshape”. Estos valores se encontrarán en la última fila de las dos primeras columnas de los datos.

Puesto que en la función “maximocorte” se normaliza y se eliminan las pérdidas por propagación. En esta también se realizarán los mismos pasos que en la función “maximocorte”.

Se recorrerán todos los datos y se buscará el mayor máximo en cada punto (x, y) desde 1 hasta el número de puntos totales y se guardará el máximo con su correspondiente posición en dos vectores distintos.

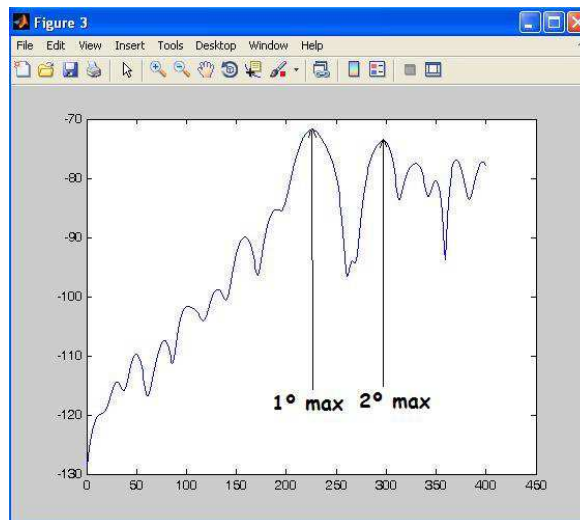


Figura 47: Imagen de la señal en un punto indicando el 1º y 2º máximo

Para buscar el segundo máximo se recorrerán todos los datos otra vez y se eliminarán las zonas cercanas al primer pico aproximándolas a la media. Una vez encontrado el segundo máximo se guardarán el valor y la posición en otros dos vectores distintos.

Si el segundo máximo presenta un valor superior al primero intercambiamos las posiciones para poder dibujar el objeto correctamente. Este error será debido a las pérdidas de propagación o a la difracción de los bordes.

A la hora de formar la imagen en 3D se creará y se recorrerá la matriz y en función de si se encuentra entre las dos posiciones obtenidas anteriormente se colocará el valor correspondiente en cada punto, si no pertenece a ese intervalo se colocará un valor nulo. También se comprobará si el valor es menor o mayor que el límite, fijado con la función descrita en el apartado anterior, para colocar su valor o hacerlo nulo. [Anexo 1.5]

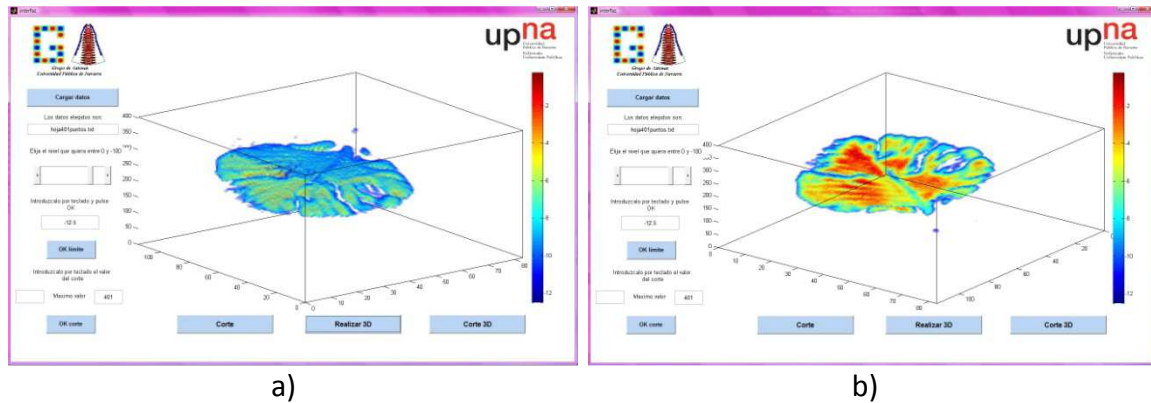


Figura 48: a) Imagen en 3D visto desde arriba. b) Imagen en 3D pero rotado y visto desde abajo

En la figura 48 se muestra la imagen 3D de una hoja vista de frente (figura 48.a) del envés (figura 48.b). En la figura 48.b se muestran más zonas rojas, esto es debido a que las ondas de THz inciden en esa zona perpendicularmente, reflejando la onda, mostrándose como un valor cercano a 0. Sin embargo la figura 48.a tiene tonalidades azules debido a que al atravesar la hoja, los THz se van atenuando poco a poco y perdiendo valor.

3.3.3 Realización corte en 3D

Esta función tiene el nombre de “matrizcorte”. A continuación se adjunta el diagrama de bloques:

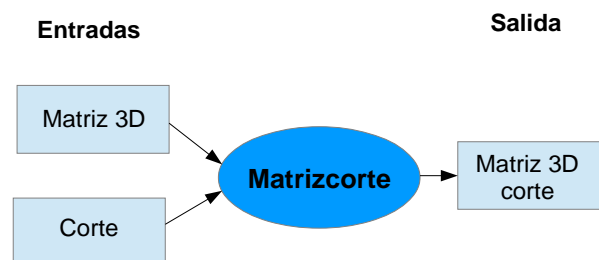


Figura 49: Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la función.

Las entradas a esta función son la matriz de tres dimensiones creada en la función “crear3” y el corte introducido por teclado. La salida será la matriz de tres dimensiones empezando en el corte.

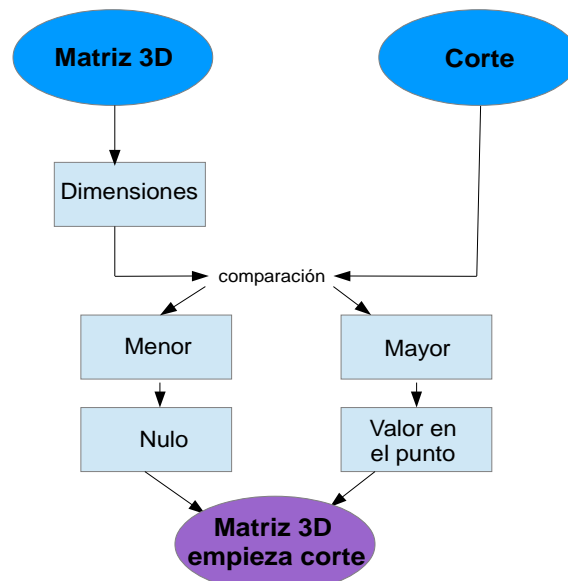


Figura 50: Diagrama de bloques de la función.

En esta función se recorre la matriz de entrada en 3D y se crea otra distinta con solo los valores mayores al corte realizado en profundidad. Es decir, una vez fijada la posición del eje Z en la que se va a realizar el corte, se genera una submatriz (x, y, z') que se obtiene de la matriz original cogiendo los valores de z que estén por encima del corte fijado. [Anexo 1.6]

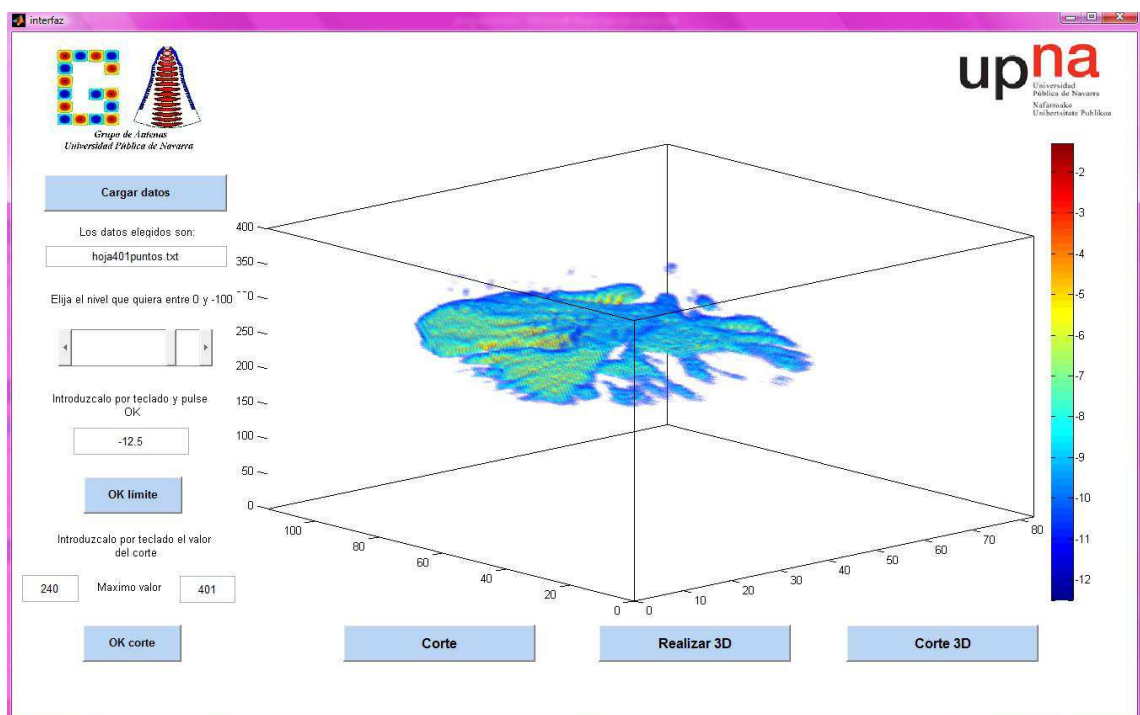


Figura 51: La imagen en 3D comenzando en el corte 240.

Se ve que se corta el 3D en la línea de los 240 puntos. También se ve la inclinación de la hoja ya que desaparecen zonas.

De esta forma se puede representar el objeto 3D a partir de distintos puntos del eje Z, con lo que se pueden eliminar zonas del objeto, ya que se muestran distintas capas del mismo.

3.4 Ejemplos de datos

Para comprobar el software se han tomado muestras de diferentes objetos, de diferentes tamaños y materiales.

A continuación se muestran los diferentes objetos utilizados y un ejemplo de cada uno de ellos.

3.4.1 Objeto metal

Como primera prueba se tomó una imagen de los objetos formados por distintas piezas que creaban formas con tres zonas diferenciadas. (Figura 52) Se colocarán el objeto de metal y el de cartón conjuntamente para tomar la imagen aprovechando el mismo barrido de toma de datos y además tomándolo en las mismas condiciones del sistema de medida. También para optimizar el tiempo y tener datos de varios objetos. Por eso, el tamaño de los datos capturados era demasiado grande y tardaba mucho en ejecutarse. Pensando en mejorar el tiempo de ejecución y disminuirlo se separaron.

También se trato, en la medida de lo posible, de eliminar zonas no pertenecientes a ninguno de los dos como bordes de la imagen, zonas de separación y fondo. Estos valores se intentan ajustar al máximo para conseguir un menor tamaño de la matriz y un tiempo de ejecución bajo.

La división de los datos se consiguió a través de un script “separación” en el cual se divide la matriz cogiendo solo los valores que interesan con el comando “reshape”. Puesto que se rehacen los datos, se necesita incrementar el número de columnas en dos y colocar en su última fila el tamaño de la imagen de dos dimensiones que se quiere dibujar para automatizarlo. [Anexo 1.2]

Una vez separados los objetos, el tiempo de carga de estos disminuye notoriamente.

En este apartado se muestran los resultados del objeto metálico. Este tiene tres zonas diferenciadas unidas por medio de tornillos. (Figuras 52 y 53)

1. Zona horizontal formada por una H de metal.
2. Zona vertical formada por otra H.
3. Zona rectangular formada por un rectángulo.

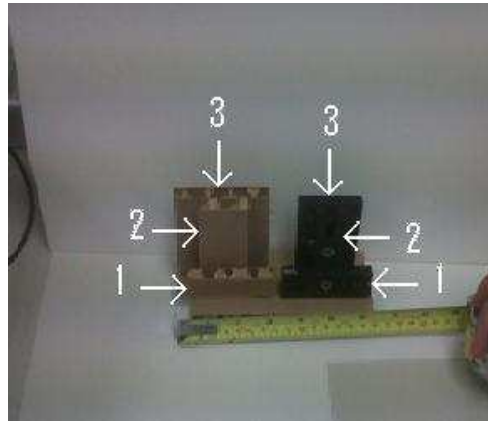


Figura 52: La imagen del objeto de cartón y el de metal.



Figura 53: Imagen del objeto de metal con las tres zonas diferenciadas.

Debido al gran tamaño de los objetos (alrededor de 8 cm de grosor) y el poco espacio entre las lentes (10 cm) hacen que la recogida de datos no fuese la óptima ya que el foco del sistema de medida no incide en la zona 1 sino en la zona 3 directamente. Por eso, tanto en el objeto metálico como en el de cartón la zona 1 no se visualiza todo lo bien que se quisiera ya que no está enfocado correctamente. Esto hará que los píxeles del objeto se vean más emborronados. Este efecto se ve perfectamente en la figura 54 ya que la zona más roja se encuentra en la zona 3 del objeto y debería estar en la 1 que no se visualiza.

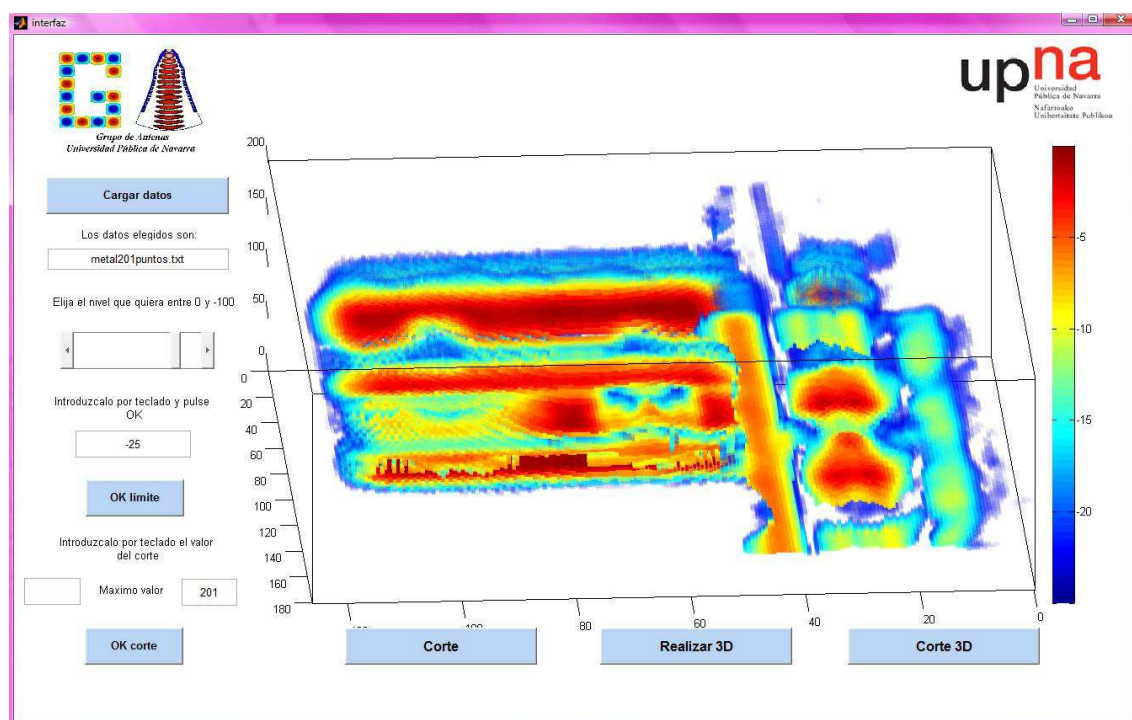


Figura 54: La imagen en 3D con un límite de -25 con vista desde abajo.

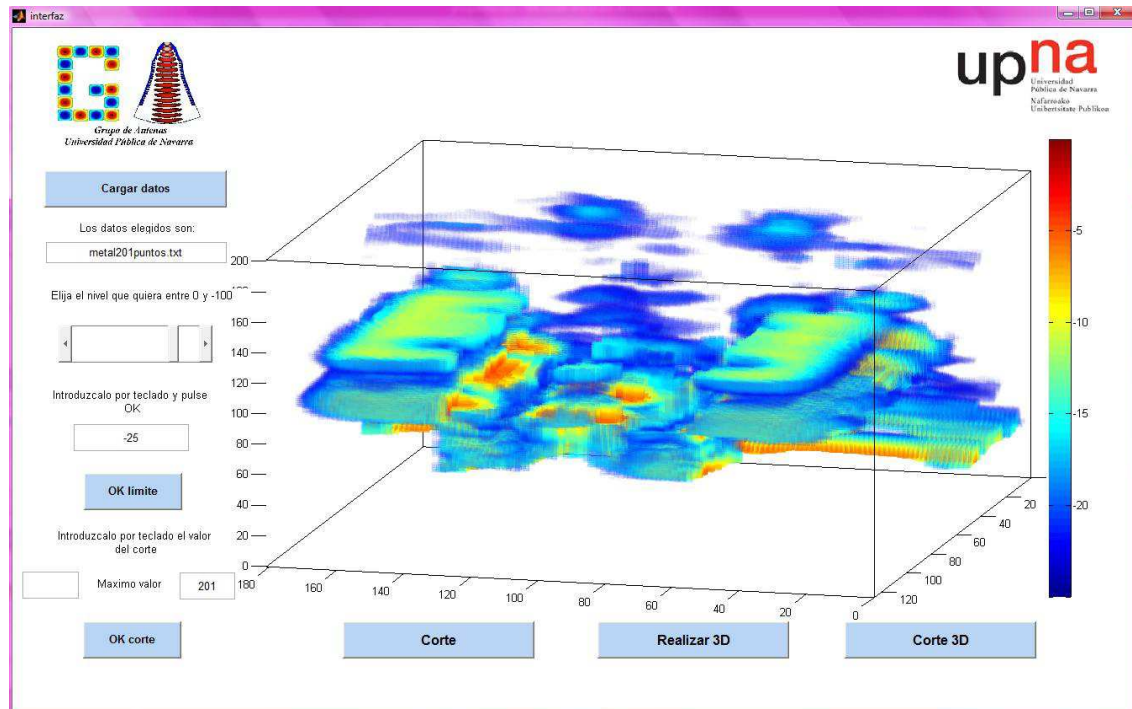


Figura 55: La imagen en 3D con un límite de -25 vista desde arriba.

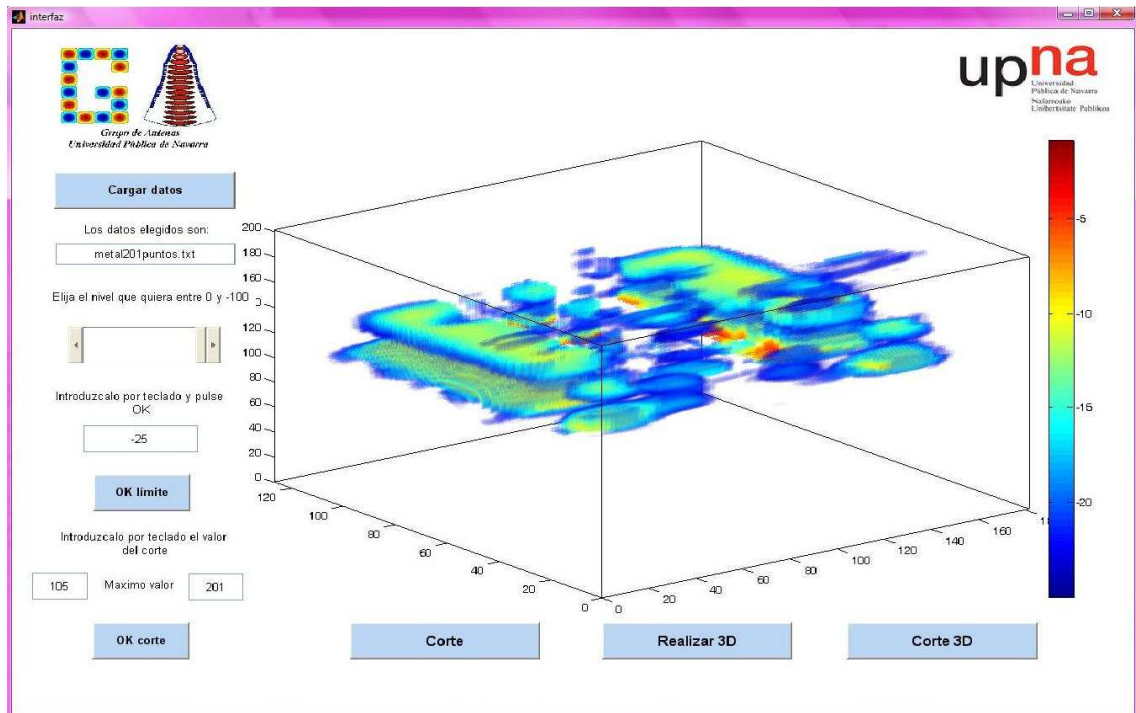


Figura 56: La imagen en 3D con límite de -25 y corte en 105.

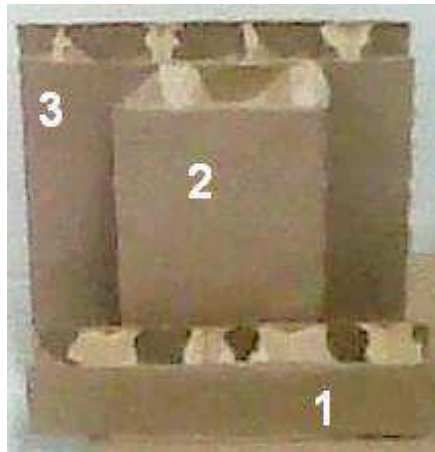
Al ejecutar el script se han tomado como límites de nivel y de corte los valores de -25 y 105 respectivamente tal y como se aprecian en las figuras 54, 55 y 56.

En la figura 54 se observa perfectamente las H, la horizontal y la vertical. También la zona rectangular se ve correctamente excepto cuando coincide con alguna otra zona. Esto es debido a que al ser metal refleja toda la señal y no deja pasar nada, esto se muestra en la figura 55 en donde se ven los surcos en vista de perfil. El tamaño del objeto en 3D es mayor pero tiene las mismas proporciones que el objeto original. Por lo tanto del objeto metálico solo se aprecia la primera cara, ya que al reflejar todo no deja ver las caras sucesivas.

3.4.2 Objeto cartón

De la misma forma que el objeto de metal este también tiene tres zonas muy diferenciadas pegadas unas a las otras (figura 52 y 56):

1. Zona horizontal formada por un rectángulo de cartón.
2. Zona vertical formada por otro rectángulo de dimensiones similares al anterior.
3. Zona rectangular formada por un rectángulo de cartón.



a)



b)

Figura 56: a) Imagen del objeto de cartón con las tres zonas diferenciadas. b) Imagen de los hexágonos del cartón.

En la figura 56 se observa el objeto de cartón. Este tiene unos hexágonos vacíos en su interior. Debido a esto, la onda reflejada tendrá menos valor por la difracción en los bordes y también por cambio de material pasando de cartón a aire y viceversa.

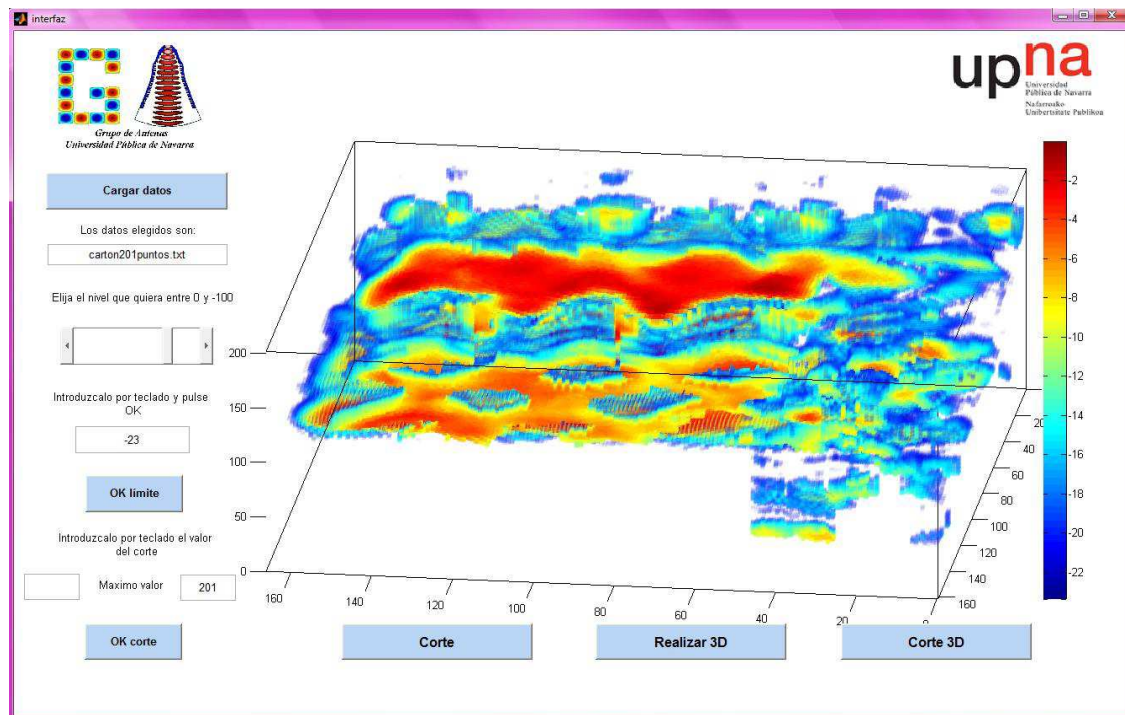


Figura 57: La imagen en 3D con un límite de -23 vista de lado.

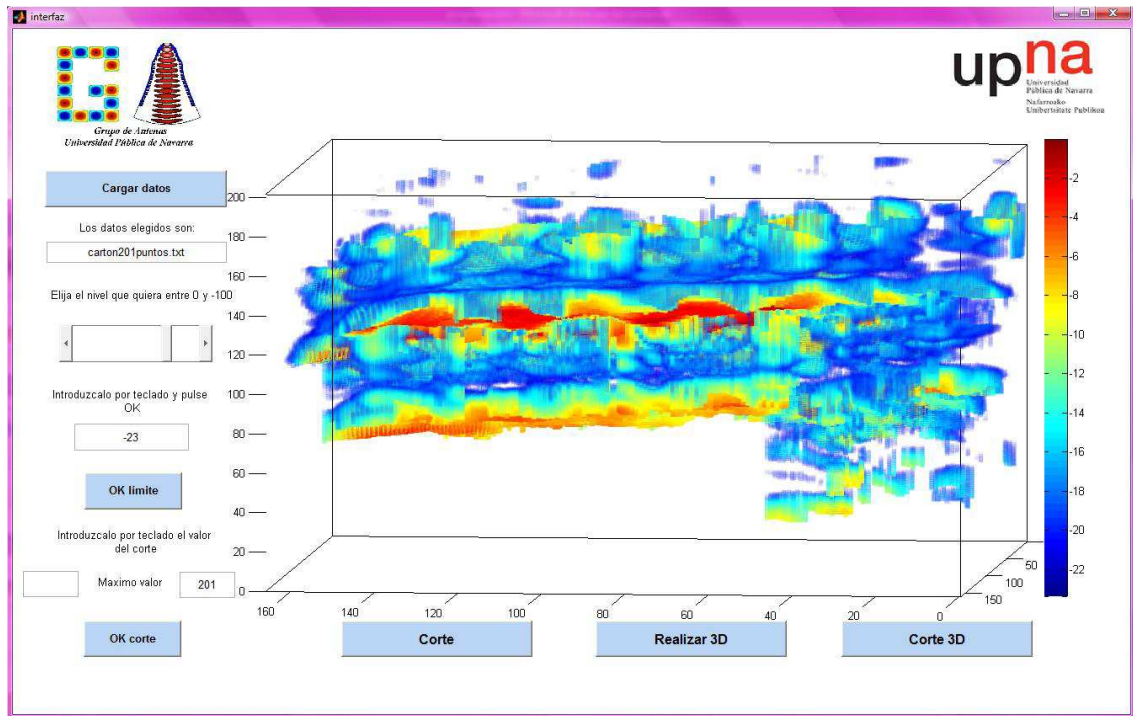


Figura 58: La imagen en 3D con un límite de -23 visto de perfil.

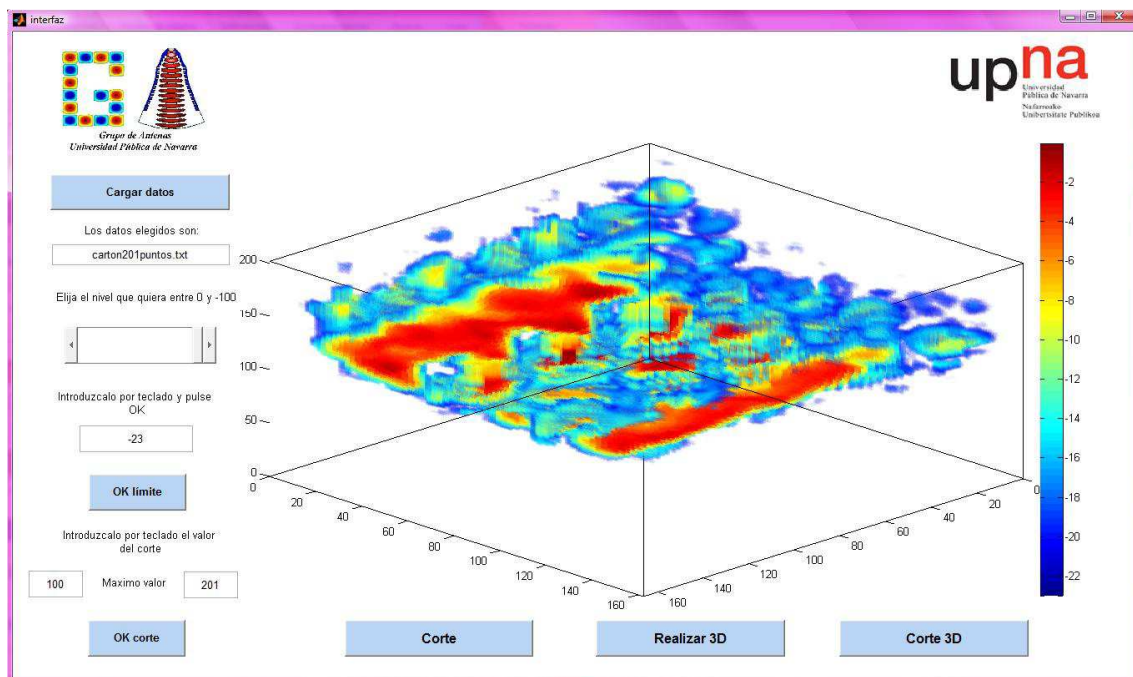


Figura 59: Imagen en 3D con un límite de -23 y corte 100.

Al ejecutar el script se han tomado como límites de nivel y de corte los valores de -23 y 100 respectivamente, tal y como se aprecia en las figuras 57, 58 y 59.

En estas se observa el cartón en 3D. Aunque el 3D tenga mayores dimensiones cumple la proporcionalidad con el objeto original.

Como en el metal, en este tampoco se visualiza perfectamente la zona 1 del objeto viéndose aún peor debido a los agujeros hexagonales de los que está compuesto el cartón. Al contrario que en el metal, parte de la onda se refleja y parte se traspasa, por eso aunque tiene menos nivel, la figura permanece igual que la original y se observa el objeto prácticamente igual al original.

Viéndolo desde la parte trasera (figura 60) se observa los huecos existentes entre la zona 1 y la 3 del objeto. Además de estos, también se observa algunos valores pertenecientes a la zona 1 del objeto.

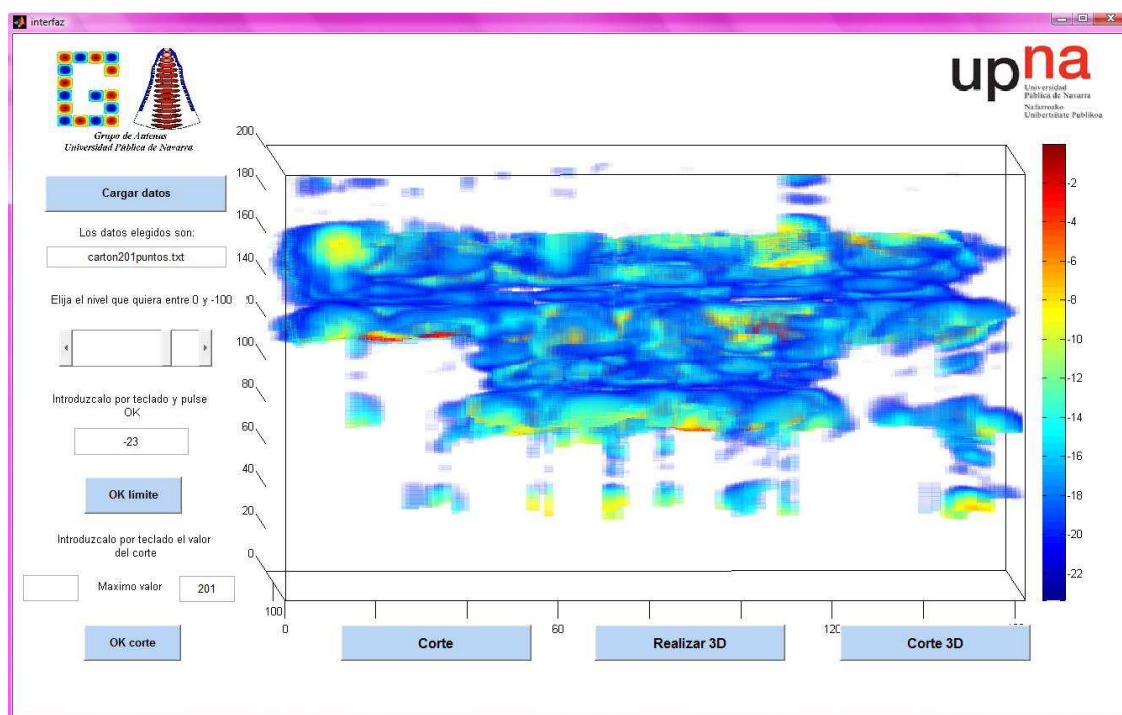


Figura 60: La imagen en 3D con un límite de -23 visto desde arriba.

En las figuras 57 y 60 se ven los hexágonos y los bordes de estos. Estos bordes aumentan de tamaño debido a la difracción. Esto también afecta a los bordes del objeto en general y por eso se ven tan redondeados.

3.4.3 CD

Una vez realizada la prueba con los objetos de metal y de cartón se decidió buscar algún otro objeto del que ya tuviésemos los datos tomados para no demorarse

y que se supiese que daban una solución óptima debido a su utilización en otras técnicas de THz. A diferencia del objeto de metal y de cartón, el CD ocupaba en su totalidad los datos y solo se recortó el fondo para disminuir su tamaño sin afectar al objeto en sí y disminuir el tiempo de ejecución.

El CD tiene tres zonas muy diferentes:

1. El CD propiamente dicho será un objeto metálico donde refleje parte de las ondas que incidan en él.
2. Zona acristalada de la caja.
3. Zona interna de plástico también de la caja



Figura 61: La imagen de un ejemplo de CD

En este objeto se verá como se aprecia en la figura 62, la interacción de las ondas de THz con los diferentes materiales que forman el CD y su caja. El disco será la zona donde mayor nivel tenga por ser metálico, ya que reflejará toda la señal. La zona de la caja al tener surcos y estar en diferentes alturas tendrá mayor o menor valor en función de estas. En los bordes también se tendrá difracción. En el eje de la caja también se verán unas pequeñas pestañas en las que se sujeta la carátula.

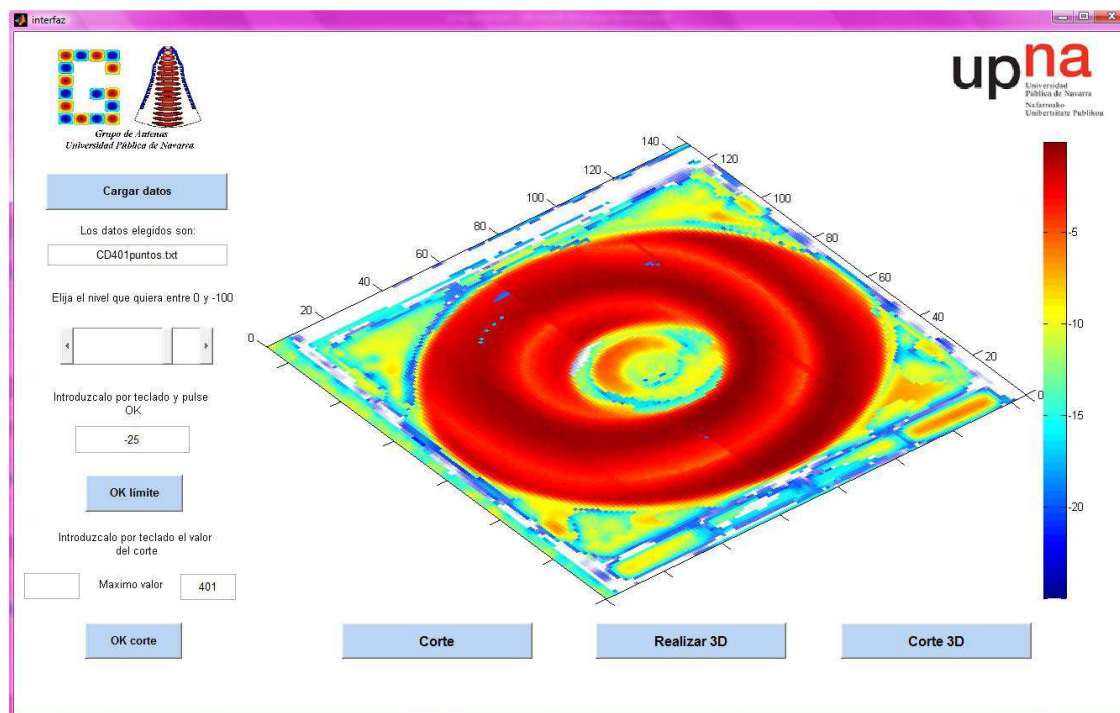


Figura 62: La imagen en 3D con un límite de -25 visto desde abajo.

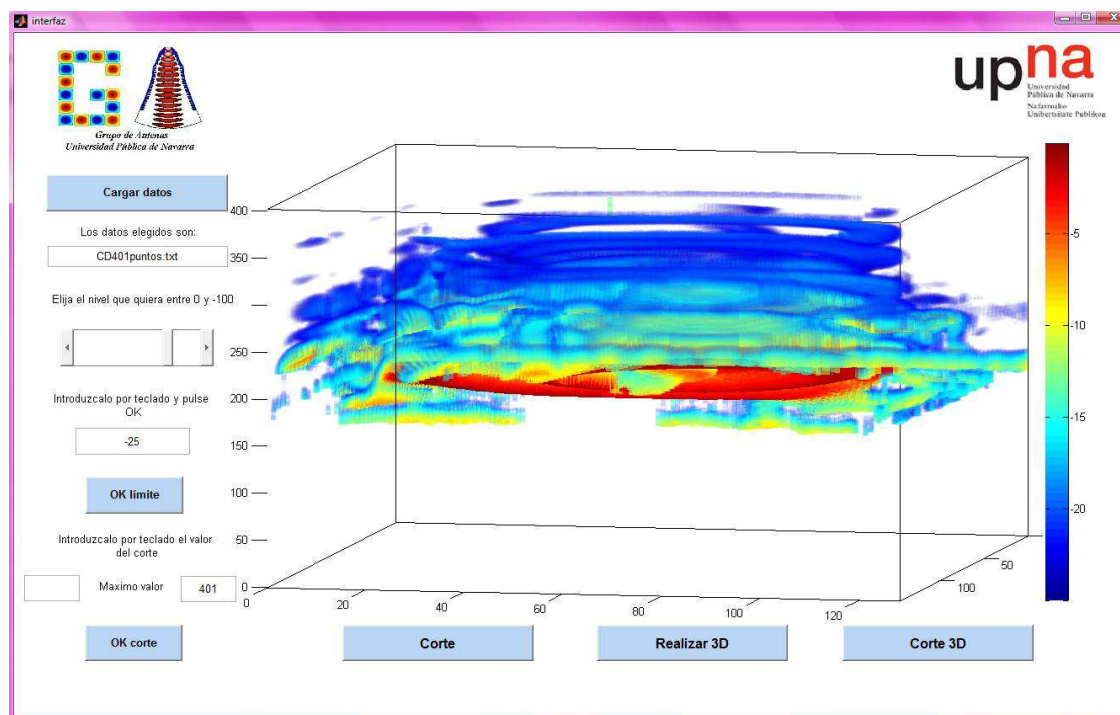


Figura 63: La imagen en 3D con un límite de -25 visto de lateral.

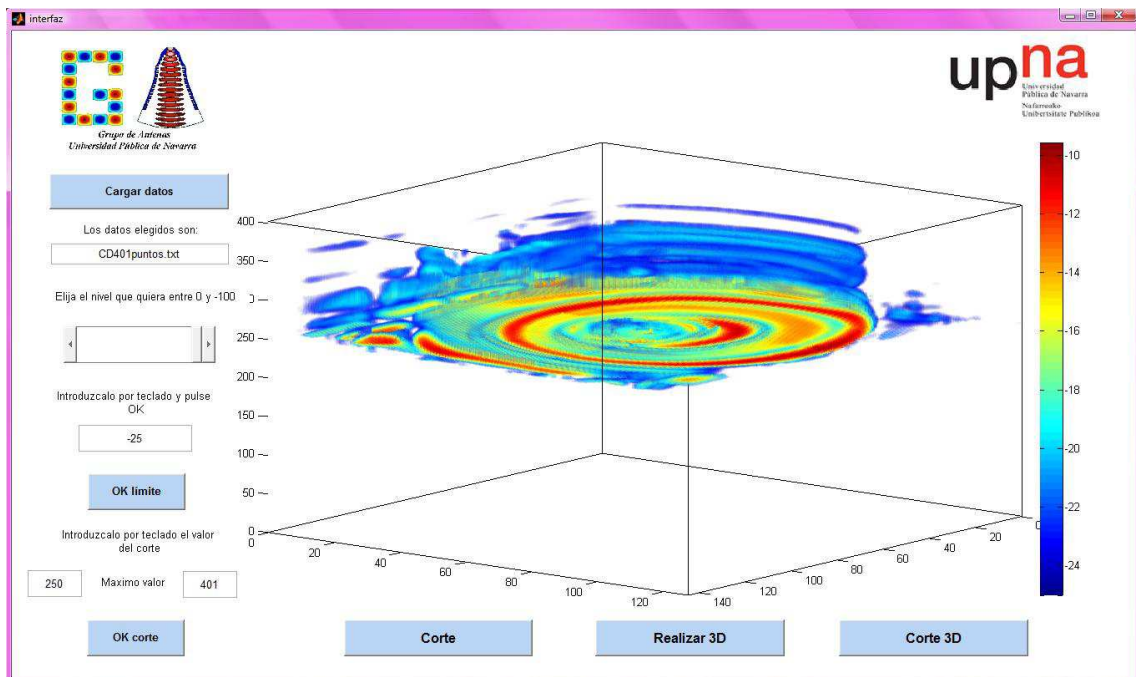


Figura 64: La imagen en 3D con un límite de -25 y con corte 250.

Al ejecutar el script se han tomado como límites de nivel y de corte los valores de -25 y 250 respectivamente, tal y como se aprecia en las figuras 62, 63 y 64.

En las figuras anteriores se ven las diferentes zonas del objeto. El disco circular con un mayor nivel puesto que es metálico. Eso también hace que aumente el tamaño del objeto en profundidad ya que al ser semimetálico deja pasar la suficiente información para que no se anule la imagen.

En la caja se verán las zonas de las esquinas de diferente color puesto que están a diferente altura y también en el eje de la caja donde se observan cuatro muescas con diferente nivel en los bordes debido a la difracción sufrida en estos.

3.4.4 Hoja

Otro ejemplo de datos capturados con anterioridad fue la hoja. Esta fue capturada en un principio para hacer un estudio sobre el contenido de agua, explicado en el capítulo 2.

Puesto que el tamaño de los datos era demasiado grande y en las imágenes se observaba gran parte del fondo se decidió recortarla hasta llegar a la solución más ajustada posible, todo ello para disminuir el tiempo de ejecución.

La hoja da muy buenos resultados a la hora de representarla en donde se observa hasta el grosor de la hoja.



Figura 65: La imagen original de la hoja

Con diferentes imágenes variando el límite se observan los nervios tanto primarios como secundarios y el peciolo, siendo las dimensiones de la hoja simulada proporcionales a la hoja original y el grosor de esta de unos pocos puntos lo que supone una gran precisión a la hora de realizar el corte en 3D.

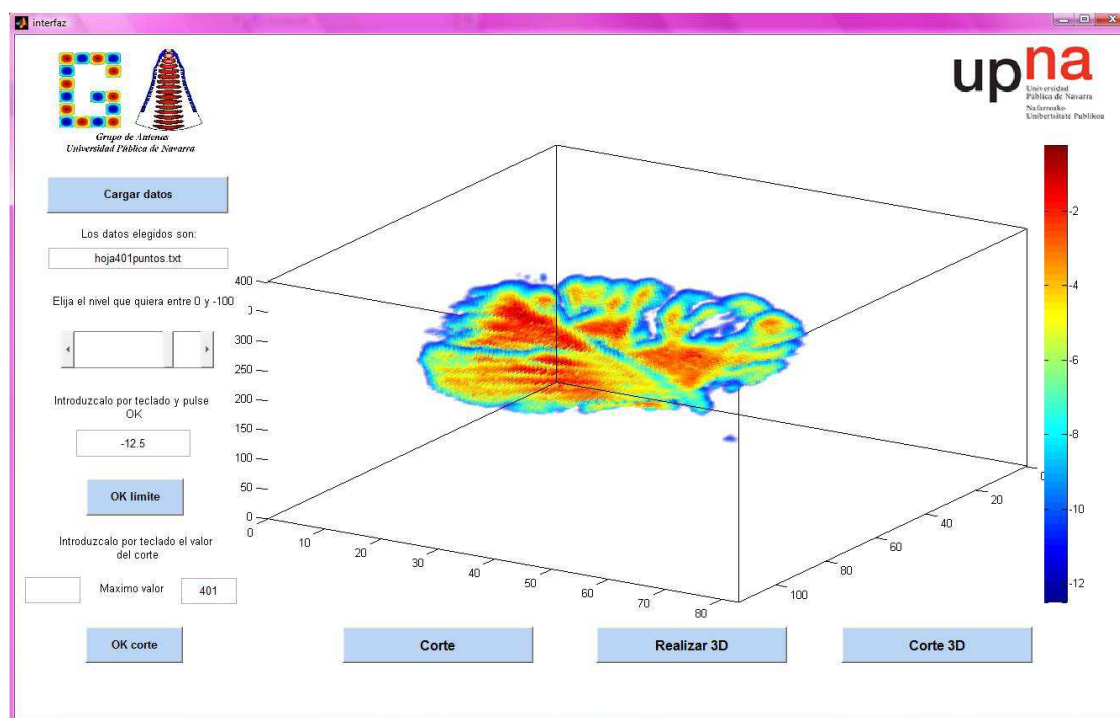


Figura 66: La imagen en 3D con un límite de -12.5 visto desde abajo.

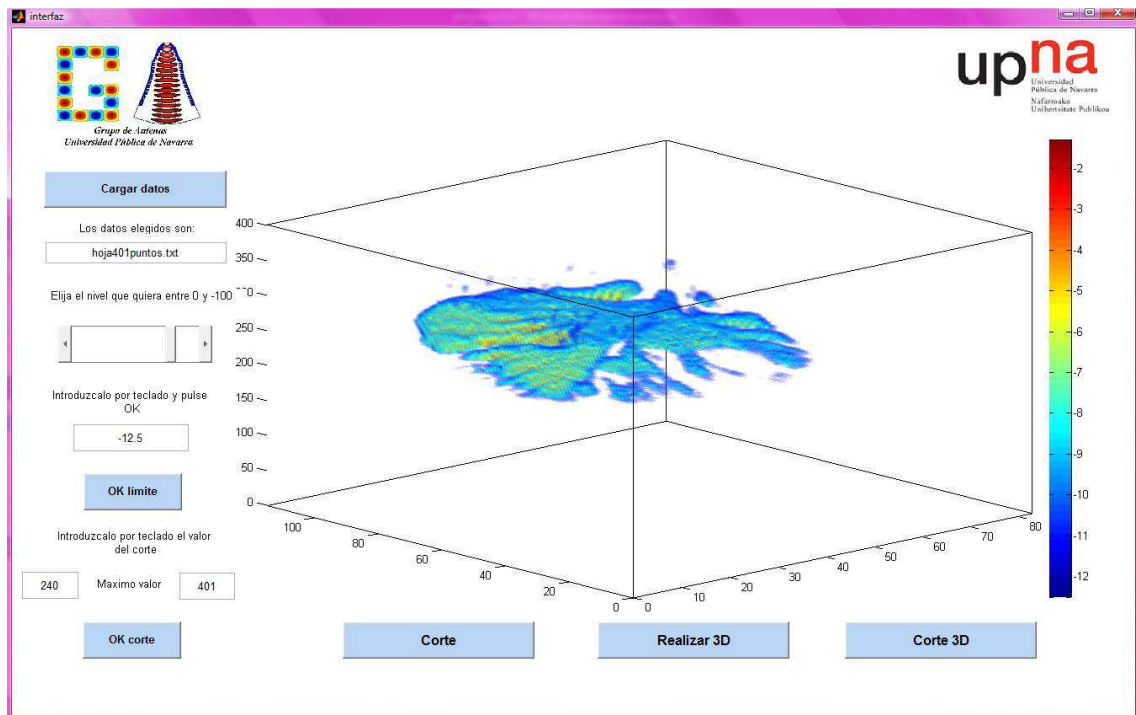


Figura 67: La imagen en 3D con un límite de -12.5 y corte 240.

Al ejecutar el script se han tomado como límites de nivel y de corte los valores de -12.5 y 240 respectivamente, tal y como se aprecia en las figuras 66 y 67.

CAPITULO 4: LÍNEAS FUTURAS Y CONCLUSIONES.

4.1 Conclusiones

El rango de los THz es la parte del espectro electromagnético menos explotada, ya que hasta hace poco se carecía de fuentes y detectores en este rango frecuencial.

En los últimos años, se ha visto el gran potencial que tienen las imágenes de THz en diversas aplicaciones. Las imágenes pueden clasificarse de diferente forma:

- En función de cómo se propague
 - Por pulsos
 - Por ondas continuas
- En función de cómo se capte
 - Con cámaras activas
 - Con cámaras pasivas
- En función de la resolución espacial
- En función de la relación señal / ruido

Los campos y las aplicaciones que utilizan las imágenes de este rango son los siguientes:

- Campo de la seguridad
 - Detección de armas y objetos ocultos
- Campo de la industria
 - Ensayos no destructivos (NDT)
 - En hojas
 - En alimentos
 - Contenido de agua en las hojas
 - Evaluación no destructiva de los corchos
- Campo de la biomedicina
 - Oncología
 - Salud dental

- Dermatología
- Otros campos de aplicación
 - Estructura molecular
 - Cambios en el estado de la materia
 - Imágenes de THz de sustancias en polvos

A la hora de realizar el programa se investigó cómo realizar una imagen en tres dimensiones incluyendo el término de voxel que más tarde ayudaría a comprender y realizar el objeto en 3D a través de diferentes datos.

Las imágenes se obtuvieron a través del instrumental del Grupo de Antenas de la universidad, tomando datos de píxeles en transmisión (S_{21}) y reflexión (S_{11}) tanto en tiempo como en frecuencia, utilizando en el proyecto solo los datos de S_{11} en tiempo por su mayor percepción de la profundidad, es decir, la llamada tercera dimensión.

Todas las funciones de este proyecto se programan por separado y realizan el máximo corte, la visualización del objeto en 2D y el objeto en 3D a partir de un determinado corte para introducirlas en la interfaz desde la cual se introducirán por teclado el valor del límite y del corte.

En las funciones, se tratan los datos para compensar la atenuación con la distancia y así poder encontrar los picos con mayor valor, que representan los cambios de superficies, todo esto normalizado al máximo absoluto de la matriz original.

En la primera se creará una imagen en dos dimensiones donde se colocarán los máximos normalizados y en función del límite que se introduzca por teclado, eliminar dicho valor o no para llegar a visualizar solo el objeto.

Para la realización del 3D se encontrarán el primer y segundo máximo que serán la primera cara donde incide la onda y tiene mayor valor y la última donde acaba el objeto. Con estos dos valores, se dibujará el objeto con el valor correspondiente en cada punto en función de si cumple o no el límite establecido. Si está por debajo del límite se pone transparente y si no se mantiene su valor.

Y por último, la función que realiza el objeto en 3D empezando desde un determinado corte. Este solo deberá ejecutarse cuando se obtenga el objeto en 3D definitivo ya que hace el corte de la última imagen ejecutada.

Con la creación de la interfaz y la introducción de parámetros por teclado, se consigue automatizar el sistema y poder visualizar cualquier objeto en 3D con mejor o peor calidad.

Por lo tanto, a modo resumen, se puede decir que se ha creado una interfaz en Matlab que a partir de los datos tomados en tiempo de la reflexión de un objeto muestra una imagen 2D para que se fije el límite de lo que se quiere ver como

transparente para posteriormente generar su imagen tridimensional. A su vez, de esta imagen 3D se puede elegir un plano de corte desde el que empezar a representar el 3D, con idea de ir mostrando la imagen por diferentes capas.

4.2 Líneas futuras

Son diversas las mejoras que se pueden introducir a este software inicial de muestra de imágenes de THz en 3D. En este apartado se van a exponer varias de las que se dejan abiertas como líneas futuras de trabajo.

Respecto a mejoras de programación se podría conseguir ajustar la matriz final en 3D solo a las posiciones donde tenga valor y no sea nulo. De esta forma, la imagen del objeto tendría mayor precisión y el tiempo de ejecución disminuiría al tener que representar una matriz de dimensiones más pequeñas; es decir eliminar los cortes anteriores y posteriores del objeto.

También se podrían hacer cortes en los diferentes ejes X e Y, no solo en el eje Z para así poder visualizar cómo se comporta el objeto en su interior. El eje Y será aquel en el que corta la imagen y se obtiene la vista de perfil mientras que si se corta por el eje X se obtiene una vista de alzado.

Otra mejora, en este caso a la hora de tomar los datos, sería ajustar las lentes y los objetos para que el foco del sistema de medida coincida con la primera capa y no se pierda nitidez como en el objeto de metal y de cartón.

Sería interesante eliminar las múltiples reflexiones de las lentes y así se podría conseguir una imagen más “limpia”. Durante el transcurso del proyecto se intentó buscar las reflexiones tanto en el metal como en el cartón comparando las ondas en posiciones cercanas. Comparando ondas en diferentes puntos se tiene que observar múltiples reflexiones de las lentes. Estas se detectaban y se encontraban cada 30 - 40 puntos aproximadamente en función del punto, ya que en alguno estos valores cambiaban. Por ello, no se pudo mejorar en su día.

También tratar de detectar e identificar objetos extraños tanto en imágenes en 2D como en 3D. Para ello se necesitará usar técnicas de detección como por ejemplo el promediado de curvas de nivel. Al dibujar el 3D tendría que conseguirse que se mostrase dónde se encuentra exactamente el objeto identificando las coordenadas en las que se encuentra. Esto ya se ha realizado para imágenes en 2D y ahora habría que extrapolarlo a las de 3D.

ANEXO A: Funciones del programa

Anexo A.1: Función vol3D

```
function [model] = vol3d(varargin)
%H = VOL3D Volume render 3-D data.
% VOL3D uses the orthogonal plane 2-D texture mapping technique for
% volume rendering 3-D data in OpenGL. Use the 'texture' option to fine
% tune the texture mapping technique. This function is best used with
% fast OpenGL hardware.
%
% vol3d                                Provide a demo of functionality.
%
% H = vol3d('CData',data) Create volume render object from input
%                               3-D data. Use interp3 on data to increase
volume                               rendering resolution. Returns a struct
%                               encapsulating the pseudo-volume rendering
object.
%                               XxYxZ array represents scaled colormap
indices.
%                               XxYxZx3 array represents truecolor RGB
values for
%                               each voxel (along the 4th dimension).
%
% vol3d(...,'Alpha',alpha) XxYxZ array of alpha values for each voxel,
in
%                               range [0,1]. Default: data (interpreted as
%                               scaled alphamap indices).
%
% vol3d(...,'Parent',axH) Specify parent axes. Default: gca.
%
% vol3d(...,'XData',x) 1x2 x-axis bounds. Default: [0 size(data, 2)].
% vol3d(...,'YData',y) 1x2 y-axis bounds. Default: [0 size(data, 1)].
% vol3d(...,'ZData',z) 1x2 z-axis bounds. Default: [0 size(data, 3)].
%
% vol3d(...,'texture','2D') Only render texture planes parallel to
nearest
%                               orthogonal viewing plane. Requires doing
%                               vol3d(h) to refresh if the view is
rotated
%                               (i.e. using cameratoolbar).
%
% vol3d(...,'texture','3D') Default. Render x, y, z texture planes
%                               simultaneously. This avoids the need to
%                               refresh the view but requires faster
OpenGL
```

```

%                                     hardware performance.
%
% vol3d(H)  Refresh view. Updates rendering of texture planes
%           to reduce visual aliasing when using the 'texture'='2D'
%           option.
%
% Copyright Joe Conti, 2004
% Improvements by Oliver Woodford, 2008-2011, with permission of the
% copyright holder.

if nargin == 0
    demo_vol3d;
    return
end

if isstruct(varargin{1})
    model = varargin{1};
    if length(varargin) > 1
        varargin = {varargin{2:end}};
    end
else
    model = localGetDefaultModel;
end

if length(varargin)>1
    for n = 1:2:length(varargin)
        switch(lower(varargin{n}))
            case 'cdata'
                model.cdata = varargin{n+1};
            case 'parent'
                model.parent = varargin{n+1};
            case 'texture'
                model.texture = varargin{n+1};
            case 'alpha'
                model.alpha = varargin{n+1};
            case 'xdata'
                model.xdata = varargin{n+1}([1 end]);
            case 'ydata'
                model.ydata = varargin{n+1}([1 end]);
            case 'zdata'
                model.zdata = varargin{n+1}([1 end]);
        end
    end

end

end

if isempty(model.parent)
    model.parent = gca;
end

[model] = local_draw(model);

%-----%
function [model] = localGetDefaultModel

model.cdata = [];
model.alpha = [];
model.xdata = [];
model.ydata = [];
model.zdata = [];

```

```

model.parent = [];
model.handles = [];
model.texture = '3D';
tag = tempname;
model.tag = ['vol3d_' tag(end-11:end)];

%-----%
function [model,ax] = local_draw(model)

cdata = model.cdata;
siz = size(cdata);

% Define [x,y,z]data
if isempty(model.xdata)
    model.xdata = [0 siz(1)];
end
if isempty(model.ydata)
    model.ydata = [0 siz(2)];
end
if isempty(model.zdata)
    model.zdata = [0 siz(3)];
end

try
    delete(model.handles);
catch
end

ax = model.parent;
cam_dir = camtarget(ax) - campos(ax);
[m,ind] = max(abs(cam_dir));

opts =
{'Parent',ax,'cdatamapping',[],'alphadatamapping',[],'facecolor','text'
uremap','edgealpha',0,'facealpha','texturemap','tag',model.tag};

if ndims(cdata) > 3
    opts{4} = 'direct';
else
    cdata = double(cdata);
    opts{4} = 'scaled';
end

if isempty(model.alpha)
    alpha = cdata;
    if ndims(model.cdata) > 3
        alpha = sqrt(sum(double(alpha).^2, 4));
        alpha = alpha - min(alpha(:));
        alpha = 1 - alpha / max(alpha(:));
    end
    opts{6} = 'scaled';
else
    alpha = model.alpha;
    if ~isequal(siz(1:3), size(alpha))
        error('Incorrect size of alphamatte');
    end
    opts{6} = 'none';
end

h = findobj(ax,'type','surface','tag',model.tag);

```

```

for n = 1:length(h)
    try
        delete(h(n));
    catch
    end
end

is3DTexture = strcmpi(model.texture, '3D');
handle_ind = 1;

% Create z-slice
if(ind==3 || is3DTexture )
    x = [model.xdata(1), model.xdata(2); model.xdata(1),
model.xdata(2)];
    y = [model.ydata(1), model.ydata(1); model.ydata(2),
model.ydata(2)];
    z = [model.zdata(1), model.zdata(1); model.zdata(1),
model.zdata(1)];
    diff = model.zdata(2)-model.zdata(1);
    delta = diff/size(cdata,3);
    for n = 1:size(cdata,3)

        cslice = squeeze(cdata(:,:,n,:));
        aslice = double(squeeze(alpha(:,:,n)));
        h(handle_ind) = surface(x,y,z,cslice,'alphadata',aslice,opts{:});
        z = z + delta;
        handle_ind = handle_ind + 1;
    end
end

% Create x-slice
if (ind==1 || is3DTexture )
    x = [model.xdata(1), model.xdata(1); model.xdata(1),
model.xdata(1)];
    y = [model.ydata(1), model.ydata(1); model.ydata(2),
model.ydata(2)];
    z = [model.zdata(1), model.zdata(2); model.zdata(1),
model.zdata(2)];
    diff = model.xdata(2)-model.xdata(1);
    delta = diff/size(cdata,2);
    for n = 1:size(cdata,2)

        cslice = squeeze(cdata(:,n,:,:));
        aslice = double(squeeze(alpha(:,n,:)));
        h(handle_ind) = surface(x,y,z,cslice,'alphadata',aslice,opts{:});
        x = x + delta;
        handle_ind = handle_ind + 1;
    end
end

% Create y-slice
if (ind==2 || is3DTexture)
    x = [model.xdata(1), model.xdata(1); model.xdata(2),
model.xdata(2)];
    y = [model.ydata(1), model.ydata(1); model.ydata(1),
model.ydata(1)];
    z = [model.zdata(1), model.zdata(2); model.zdata(1),
model.zdata(2)];
    diff = model.ydata(2)-model.ydata(1);

```

```

delta = diff/size(cdata,1);
for n = 1:size(cdata,1)

    cslice = squeeze(cdata(n,:,:,:));
    aslice = double(squeeze(alpha(n,:,:)));
    h(handle_ind) = surface(x,y,z,cslice,'alphadata',aslice,opts{:});
    y = y + delta;
    handle_ind = handle_ind + 1;
end
end

model.handles = h;

function demo_vol3d
figure;
load mri.mat
vol3d('cdata', squeeze(D), 'xdata', [0 1], 'ydata', [0 1], 'zdata', [0
0.7]);
colormap(bone(256));
alphamap([0 linspace(0.1, 0, 255)]);
axis equal off
set(gcf, 'color', 'w');
view(3);

```

Anexo A.2: Script separación

```

%% separación piezas en .txt%%%%%%%%%

archivo=load('S11_tiempo_piezas_referencia.txt');
[m1,n]=size(archivo);
dimensiones
num_puntos=201;
tamx= 360;
tamy=230;

imagen1=reshape(archivo(:,3:n),tamx,tamy,num_puntos);
carton=imagen1(33:198,37:198,:);
metal=imagen1(220:345,20:200,:);

car=reshape(carton, 166*162,201);
save piezacarton.txt car -ascii

met=reshape(metal, 126*181,201);
save piezametall.txt met -ascii

%% metal
met=load('piezametall.txt');
hueco=ones(126*181,2);
hueco(22806,1)=126;
hueco(22806,2)=181;
metal=[hueco met];

save metall201.txt metal -ascii

```

```

%%carton
car=load('piezacarton.txt');
hueco=ones(166*162,2);
hueco(166*162,1)=166;
hueco(166*162,2)=162;
carton=[hueco car];

save carton201.txt carton -ascii
hoja=load('Hoja_s11_tiempo.txt');
[m1,n]=size(hoja);
%dimensiones
num_puntos=401;
imagen1=reshape(hoja(:,3:num_puntos+2),130,130,num_puntos);
hoja=imagen1(1:119,1:83,:);
car=reshape(hoja, 119*83,401);
save hoja4.txt car -ascii

%hoja
hoj=load('hoja4.txt');
hueco=ones(119*83,2);
hueco(119*83,1)=83;
hueco(119*83,2)=119;
hoja2=[hueco hoj];
save hoja401.txt hoja -ascii

%%fruto
hoja=load('Hoja_s11_tiempo.txt');
[m1,n]=size(hoja);
%dimensiones
num_puntos=401; %401;
imagen1=reshape(hoja(:,3:num_puntos+2),130,130,num_puntos);
fruto=imagen1(1:40,100:128,:);
fruc=reshape(fruto, 29*40,401);
save fruto401.txt car -ascii

```

Anexo A.3: Función recta

```

%%recta%%
function [rect]=recta(num_puntos) %recta
%num_puntos=401;
As=(335.77-277.31)/num_puntos; %mm
for i=1:1:num_puntos
    rect(i)=As*10^(-6)*(i-1); %km
    formula(i)=32.45+20*log(220)+20*log(rect(i));
end

m150=formula(150);
m165=formula(165);
m175=formula(175);
m185=formula(185);
m200=formula(200);
m190=formula(190);

```



```

d1=175-150;
h1=m175-m150;
m1=tan(h1/d1);

d2=200-165;
h2=m200-m165;
m2=tan(h2/d2);

d3=185-165;
h3=m185-m165;
m3=tan(h3/d3);

d4=200-150;
h4=m200-m150;
m4=tan(h4/d4);

media=(m1+m2+m3+m4)/4;
%punto recta
%punto 167
x=167;
y=formula(x);
n=y-media*x;
n=ceil(n);

for i=1:1:num_puntos
    rect(i)=media*i+n; %% y=m*x+n
end
end

```

Anexo A.4: Función maximocorte

```

%%máximo corte
function [imagen,xaco,yaco]=maximocorte(img,limite)

[m1,n]=size(img);
num_puntos=n-2;
a=img(m1,1);
b=img(m1,2);
xaco=0:a/(a-1):a;
yaco=0:b/(b-1):b;
rect=recta(num_puntos);

imagen1=reshape(img(:,3:num_puntos+2),a,b,num_puntos);
for k=1:1:num_puntos
    imagen11(:, :,k)=imagen1(:, :,k)+rect(:,k);
end

imagen_ref=imagen11-max(max(max(imagen11))); %normalizo

[x,y,z]=size(imagen11);
maxim=[];
for i=1:1:x
    for j=1:1:y

```

```

        xde1=imagen_ref(i,j,:);
        xde11=xde1(:);
        [maxi]=max(xde11);

        if maxi<limite
            maxi=0/0;
        end
        maxim=[maxim maxi];

    end
end
imagen=reshape(maxim,b,a);
end

```

Anexo A.5: Función crear3

```

function [imag]=crear3(cart,nivel)

[m1,n]=size(cart);
%dimensiones
num_puntos=n-2;

carton=reshape(cart(:,3:num_puntos+2),cart(m1,1),cart(m1,2),num_puntos);
[carm,carn,num_puntos]=size(carton);
carton_ref=carton-max(max(max(carton)));
%inicializo variables

xde=[];
xde2=[];
maximos=[];
posiciones=[];
maximos1=[];
posiciones1=[];

rect=recta(num_puntos);

for i=1:1:carn
    for j=1:1:carm
        xde1=carton_ref(j,i,:);
        xde11=xde1(:);
        xde=xde11+rect';
        media=mean(xde);
        [maxi posi]=max(xde);
        for k=1:1:num_puntos
            if (xde(k)<media)
                xde2(k)=media;
            else xde2(k)=xde(k);
            end
            if (k<=(posi+20)) && ( k>=(posi-20))
                xde2(k)=media;
            end
        end
    end
end

```

```

[maxi2 posi2]=max(xde2);

    if posi2<=posi
        aux=posi;
        posi=posi2;
        posi2=aux;
    end
    posiciones=[posiciones posi];
    maximos=[maximos maxi];
    posiciones1=[posiciones1 posi2];
    maximos1=[maximos1 maxi2];
end
end

m=1;

for i=1:1:carn
    for j=1:1:car_m
        for k=1:1:num_puntos
            if (k>=posiciones(m))    && (k<=posiciones1(m))
                if carton_ref(j,i,k)>=nivel
                    imag(i,j,k)=carton_ref(j,i,k);
                else imag(i,j,k)=0/0;
                end
            else imag(i,j,k)=0/0;
            end
        end
        m=m+1;
    end
end

end

```

Anexo A.6: Función matrizcorte

```

function [matrizcort]=matrizcorte(imag,c)
[x,y,z]=size(imag);
for i=1:1:x
    for j=1:1:y
        for k=1:1:z
            if k<c
                matrizcort(i,j,k)=0/0;
            else matrizcort(i,j,k)=imag(i,j,k);
            end
        end
    end
end
end

```


ANEXO B: Interfaz

```

function varargout = interfaz(varargin)
% INTERFAZ M-file for interfaz.fig
%     INTERFAZ, by itself, creates a new INTERFAZ or raises the
%     existing singleton*.
%
%     H = INTERFAZ returns the handle to a new INTERFAZ or the handle
%     to the existing singleton*.
%
%     INTERFAZ('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
%     local function named CALLBACK in INTERFAZ.M with the given input
%     arguments.
%
%     INTERFAZ('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ or
%     raises the existing singleton*. Starting from the left, property
%     value pairs are applied to the GUI before interfaz_OpeningFcn gets
%     called. An unrecognized property name or invalid value makes property
%     application stop. All inputs are passed to interfaz_OpeningFcn via
%     varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help interfaz

% Last Modified by GUIDE v2.5 29-Aug-2012 09:55:10

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @interfaz_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @interfaz_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
global auxiliar

global auxiliar1

% --- Executes just before interfaz is made visible.
function interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

```

```

% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to interfaz (see VARARGIN)

% Choose default command line output for interfaz
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes interfaz wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

logo_upna=imread('logoupna.jpg');
axes(handles.axes2);
imshow(logo_upna);
axis off

logo_antenas=imread('GA_UPNA.jpg');
axes(handles.axes3);
imshow(logo_antenas);
axis off

% --- Executes on button press in cargar.
function cargar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to cargar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

[nombrer direr]=uigetfile('*.txt','Abrir');
if nombrer==0
    return
end
handles.cargar=load(fullfile(direr,nombrer));
set(handles.datos,'String',nombrer);

[x,y]=size(handles.cargar);
set(handles.edit6,'String',y-2);

auxiliar=min(min(min(handles.cargar)));
[imagen,x,y]=maximocorte(handles.cargar,auxiliar);
%cla
axes(handles.axes1);
h3=pcolor(x,y,imagen);
shading interp;

```

```

axis tight
colorbar

guidata(hObject,handles);

% --- Executes on slider movement.
function niveles_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to niveles (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
global auxiliar

v=get(handles.niveles,'Value');
auxiliar=v;
set(handles.edit3,'String',fix(v));

guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function niveles_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to niveles (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on button press in valor.
function valor_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to valor (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global auxiliar

guidata(hObject, handles);
a=get(handles.edit3,'String');
ax=str2num(a);
auxiliar=ax;

guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in realizar.
function realizar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to realizar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
cla
global auxiliar

%Permitir rotación 3D

```



```

rotacion = rotate3d;
set(rotacion, 'RotateStyle', 'box', 'Enable', 'on')

% Logo de la UPNA
logo_upna=imread('logoupna.jpg');
axes(handles.axes2);
imshow(logo_upna);
axis off

%Eliminar rotación del logo
setAllowAxesRotate(rotacion,handles.axes2,false);

% Logo de la ANTENAS
logo_antenas=imread('GA_UPNA.jpg');
axes(handles.axes3);
imshow(logo_antenas);
axis off

%Eliminar rotación del logo
setAllowAxesRotate(rotacion,handles.axes3,false);

guidata(hObject, handles);
[imag]=crear3(handles.cargar,auxiliar);

axes(handles.axes1);
h = vol3d('cdata',imag,'texture','3D');
view(3)
colorbar
axis tight

handles.imag=imag;

guidata(hObject,handles);
image(h, 'Parent', handles.axes1);

% --- Executes on button press in corte.
function corte_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to corte (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
cla
global auxiliar

% Logo de la UPNA
logo_upna=imread('logoupna.jpg');
axes(handles.axes2);
imshow(logo_upna);
axis off

% Logo de la ANTENAS
logo_antenas=imread('GA_UPNA.jpg');
axes(handles.axes3);
imshow(logo_antenas);
axis off

guidata(hObject,handles);
[imagen,x,y]=maximocorte(handles.cargar,auxiliar);
axes(handles.axes1);
h3=pcolor(x,y,imagen);

```

```

shading interp;
axis tight
colorbar
function datos_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to datos (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of datos as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of datos
%         as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function datos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to datos (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
%              called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5
%         as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
%              called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in corte3d.
function corte3d_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to corte3d (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
cla

```

```

global auxiliar1

% Logo de la UPNA
logo_upna=imread('logoupna.jpg');
axes(handles.axes2);
imshow(logo_upna);
axis off

% Logo de la ANTENAS
logo_antenas=imread('GA_UPNA.jpg');
axes(handles.axes3);
imshow(logo_antenas);
axis off

guidata(hObject,handles);
[imagen]=matrizcorte(handles.imag,auxiliar1);

axes(handles.axes1);
h = vol3d('cdata',imagen,'texture','3D');
view(3)
colorbar
axis tight

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5
%          as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
%              called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in corteok.
function corteok_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to corteok (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global auxiliar1
guidata(hObject, handles);
b=get(handles.edit5,'String');
bx=str2num(b);
auxiliar1=bx;

```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6
as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3
as a double
```


ANEXO C: Manual de uso

C.1 Introducción

Con este programa se pretende procesar los datos obtenidos de diferentes objetos, obtener la representación en 3D de la muestra y permitir obtenerla también a partir de un plano de corte.

C.2 Iniciar el programa

Para iniciar el programa hay que:

1. Abrir Matlab y cambiar la carpeta de trabajo a la carpeta **PROYECTO**.
2. Escribir en la barra de comandos: **INTERFAZ**.

C.3 Pantalla principal

Al abrir el programa aparece la pantalla principal.

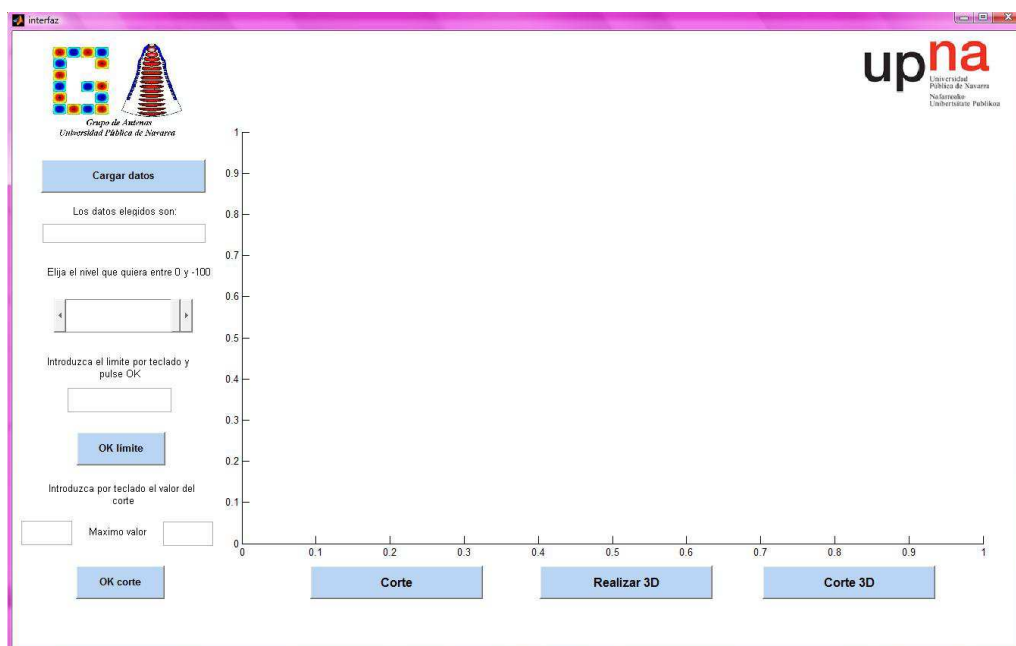


Figura C.1: Interfaz principal.

En esta pantalla aparece:

- Axes: donde se visualizaran las imágenes en 2 y 3 dimensiones.
- Botones: donde se eligen las distintas opciones.
 - Cargar datos
 - OK limite
 - OK corte
 - Corte
 - Realizar 3D
 - Corte 3D
- Slider: donde se varían los valores del límite.
- Celdas de entrada de texto variable: donde se obtienen los datos.
- Celdas de texto fijo: donde se encuentra una pequeña explicación.

A parte de esto, también se encuentran situados en las esquinas superiores derecha e izquierda los logo de la Universidad Pública de Navarra y del departamento de Antenas de la universidad.

C.4 Parámetros importantes del programa

En este programa se tienen dos parámetros que pueden variar en función del resultado más óptimo.

- El límite de acotación del objeto: este límite marca un nivel a partir del cual todo lo que tenga valores superiores a este se pintará como transparente en la imagen, con lo que se puede separar la imagen del aire que lo rodea.
- El número de corte en el que empieza la imagen en 3D: es el plano de corte a partir del cual se pinta la imagen en 3D.

C.5 Cargar datos

1. Para cargar los datos se debe pulsar el botón cargar datos. En este se encontraran los archivos .txt. Si se selecciona “all files” aparecerán también los archivos propios de Matlab.

2. Tras esto, se elige el archivo.
3. Y se obtiene por pantalla una imagen en 2D del mismo.

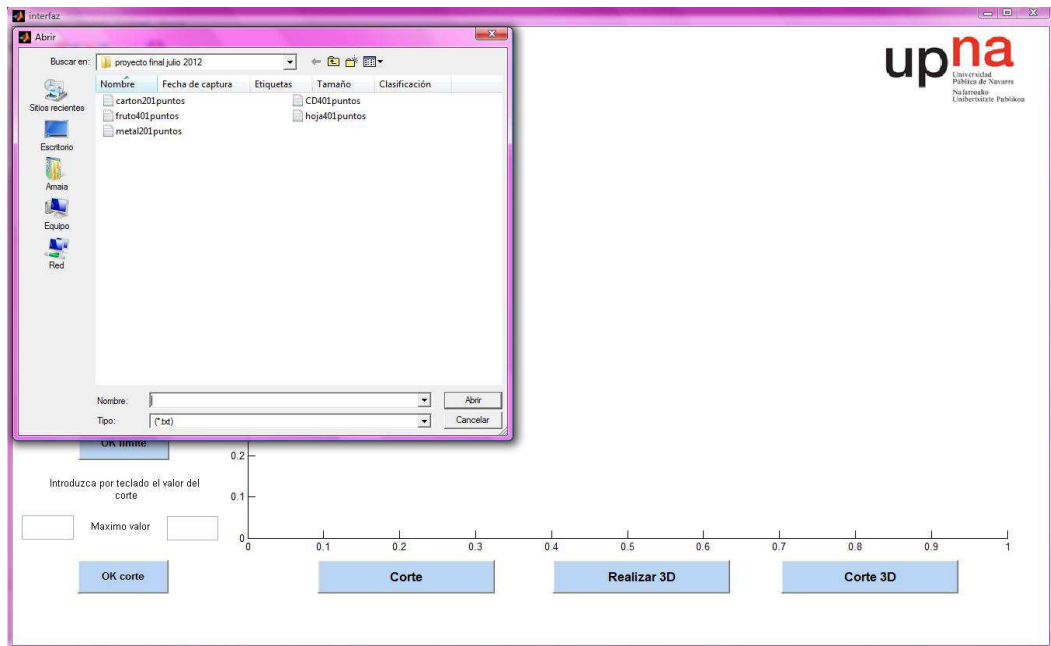


Figura C.2: Interfaz principal y ventana de cargar los datos.

Después de esto, la matriz de datos se cargará y cuando esto suceda aparecerá el nombre de dicho archivo por pantalla en la celda de texto variable. Además se cargará en el axes principal la imagen del objeto teniendo como límite su mínimo.

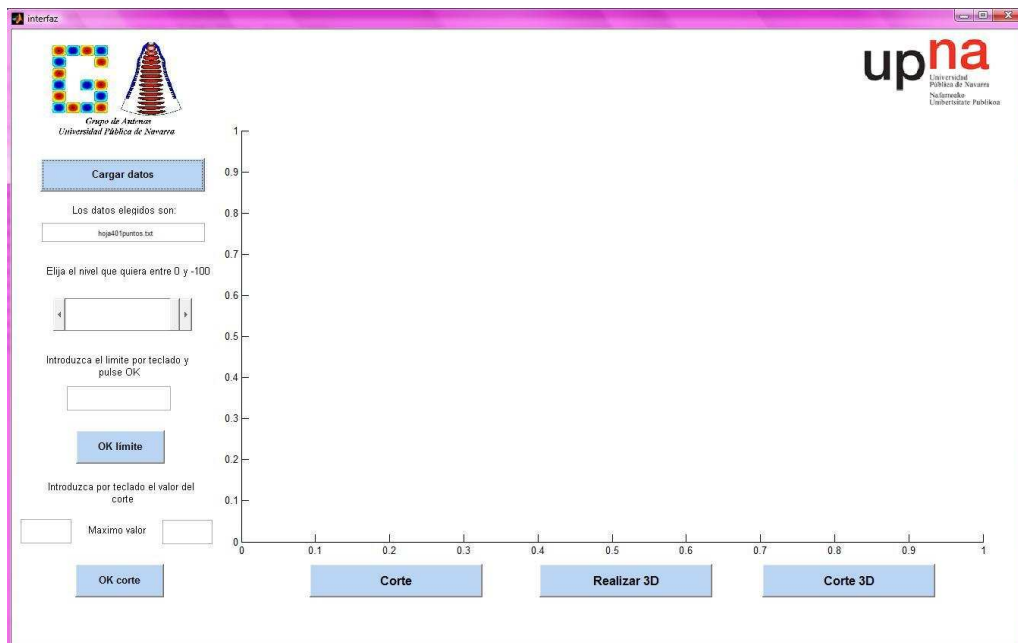


Figura C.3: Interfaz principal con los datos cargados.

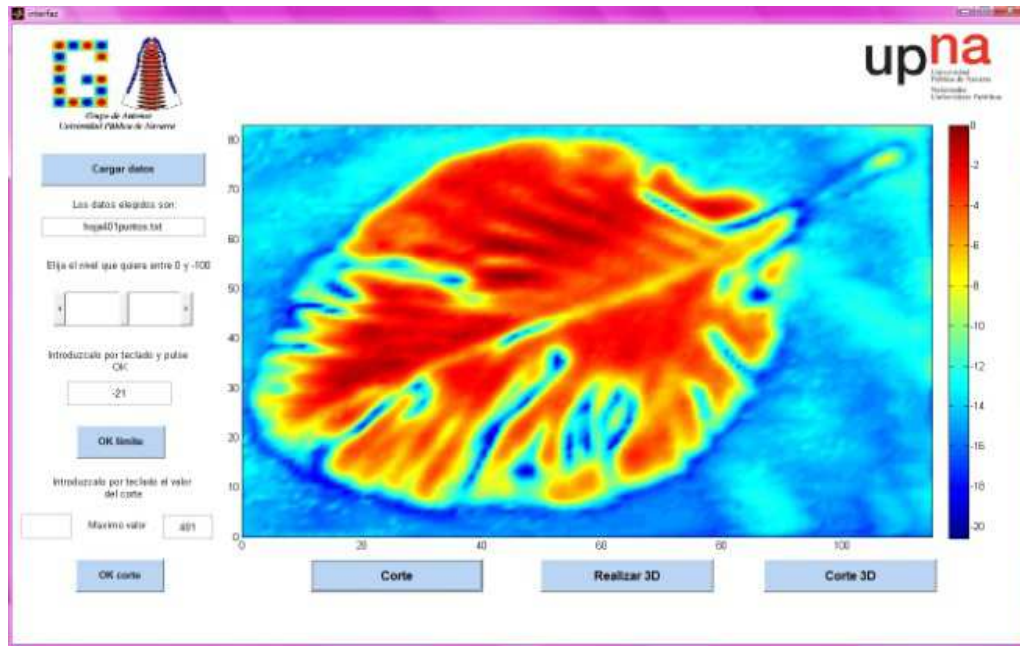


Figura C.4: Interfaz principal con los datos cargados y la imagen del objeto.

C.6 Corte en dos dimensiones

Con los datos ya cargados y la imagen mostrada por pantalla se variará el valor del límite. Puesto que la imagen está cargada, se visualizará en la barra de colores los valores de esta para elegir el límite más óptimo y eliminar las zonas innecesarias.

El valor del límite puede cambiarse de dos maneras diferentes:

- Mediante el slider:
Se varía el valor entre 0 y -100 que viene por defecto. Esta es una estimación muy poco precisa debido a que solo se obtienen los valores enteros y los cambios en el slider no se pueden controlar fácilmente. El valor elegido se visualiza por pantalla en una celda de texto.
- Mediante la introducción del valor por teclado:
Para ser más exactos a la hora de poner el límite se puede introducir por teclado el valor elegido. Este valor puede tener tantos decimales como se quiera. Para que se ejecute con este valor se debe accionar el botón “OK límite”.

Tanto cambiando el valor de un modo u otro, este se guarda en los datos del programa y se puede ejecutar y cambiar el corte tanta veces como se necesite. Para ello, se visualizará la barra de colores en la que va variando el valor de la imagen.

Para realizar el corte solo hace falta pulsar el botón “Corte” y tras ejecutar la función unida a él se obtiene una imagen en dos dimensiones del corte del objeto donde se muestra el máximo en cada punto.

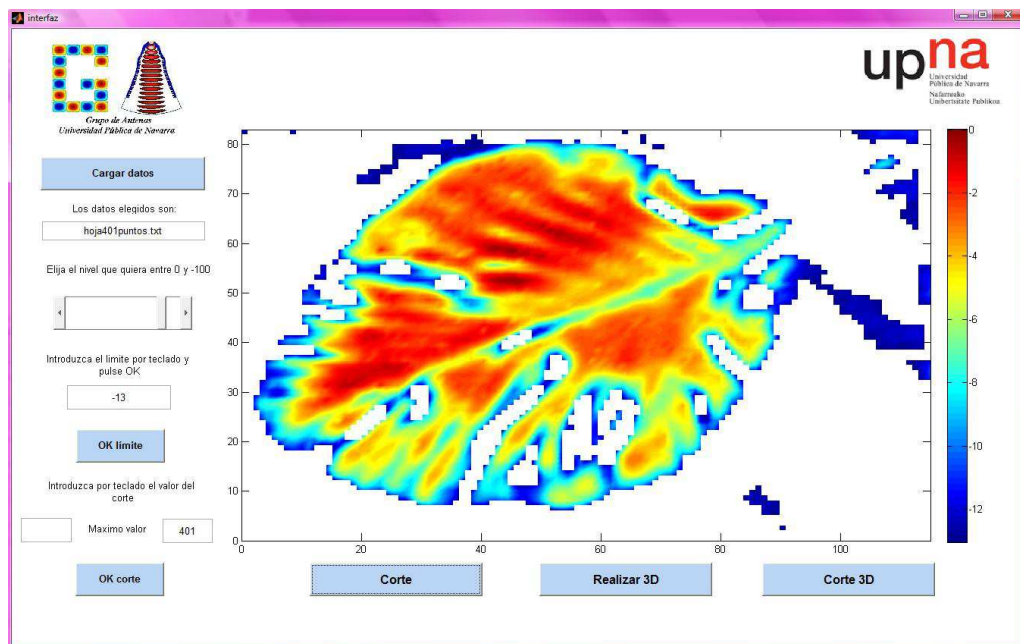


Figura C.5: Imagen con limite de -13.

C.7 Realización del objeto en 3D

Después de realizar el corte y llegar al más óptimo se realizará el 3D. Para ello, se pulsará el botón “Realizar 3D” y se ejecutará la función establecida guardando la matriz tridimensional en memoria.

Se puede variar el límite y realizar el 3D pero el tiempo de ejecución es de mayor duración y se perdería mucho tiempo.

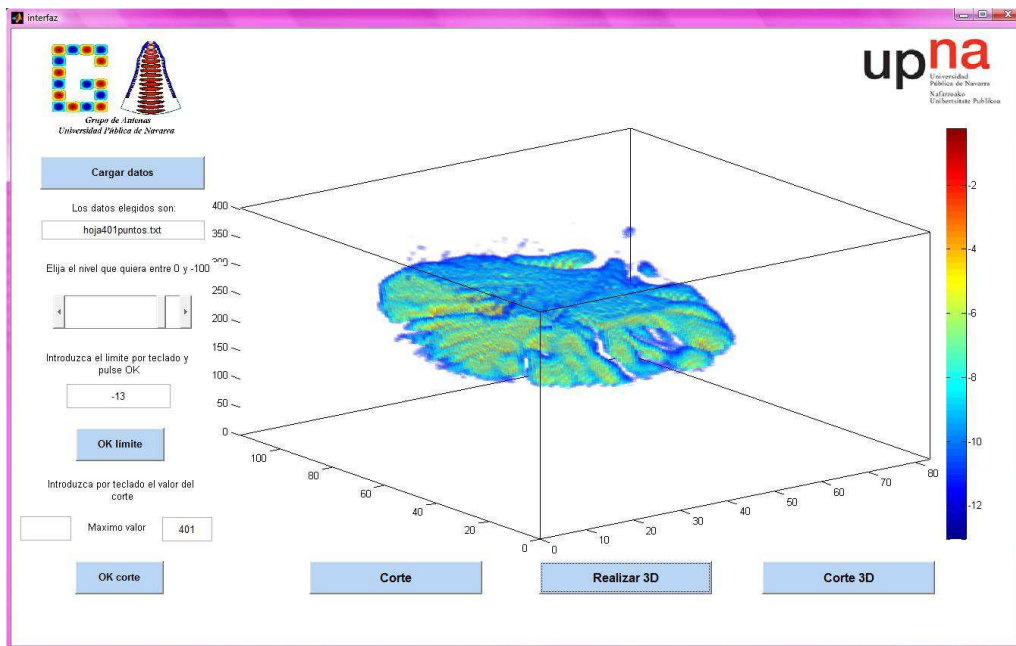


Figura C.6: Imagen en 3D con límite de -13.

C.8 Realización del objeto en 3D empezando desde un plano de corte

En este apartado se utilizará la matriz tridimensional guardada en memoria.

Para realizarlo, habrá que elegir el plano de corte en función del 3D y visualizar la altura para elegir el valor e introducirlo por teclado. Para guardar este valor se pulsará “OK corte” y se guardará en memoria.

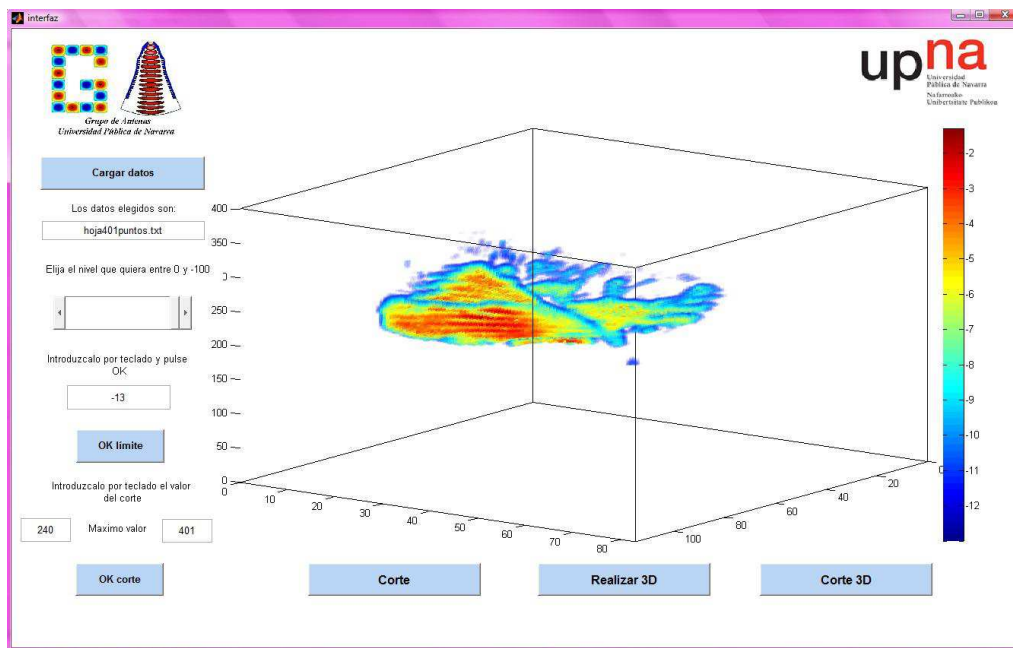


Figura C.7: Imagen 3D del objeto con limite -13 y corte 240.

C.9 Rotación objetos

Para poder visualizar mejor las imágenes en 3D pueden rotarse. Situando el cursor encima del 3D aparecerá el símbolo de rotación.

Cuando se rota, aparecen unas líneas en la dirección de la rotación las cuales marcan dónde va la cuadrícula de la matriz.

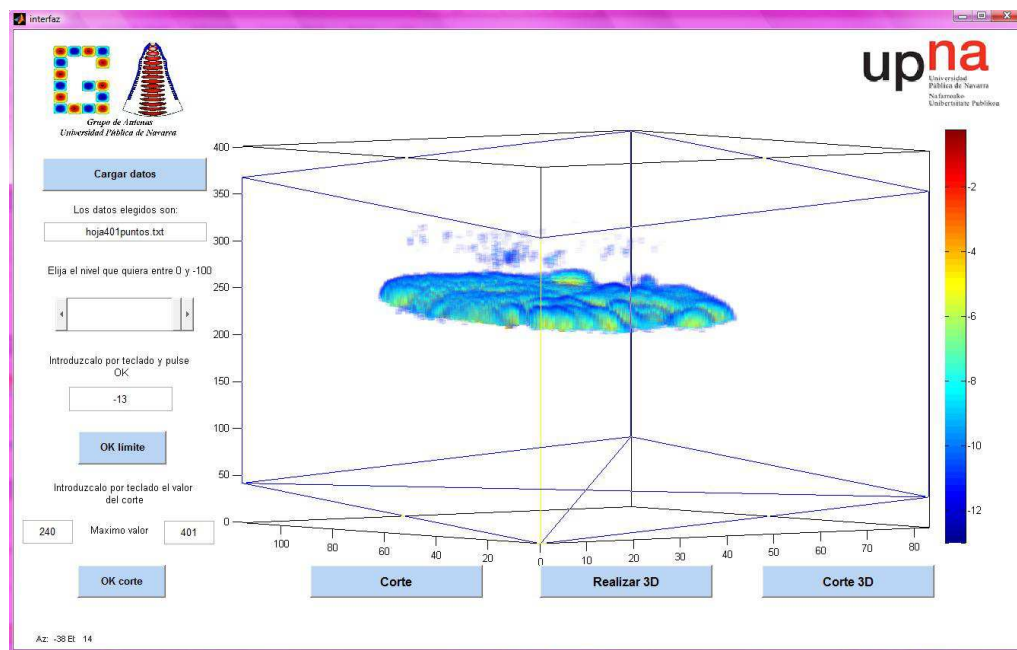


Figura C.8: Imagen 3D del objeto con limite -13 y corte 240 rotado.

Solo se podrá realizar la rotación cuando se encuentra dibujado un objeto en 3D, nunca en 2D. Por eso ni siquiera da la oportunidad de rotar los logos.

REFERENCIAS

- [1] Terahertz (THz) Technology: An Introduction and Research Update
- [2] X.-C ZHANG, J. XU. Introduction to THz Wave Photonics. Chapter 1, Terahertz radiation.
- [3] SIEGEL, P.H., 2003. THz Technology: An Overview. *International Journal of High Speed Electronics and systems*, **13**(2), 351-394.
- [4] E. BRUNDERMANN AT AL. Terahertz Techniques. Chapter 1, Introduction: 1,1 The Terahertz Spectral Region.
- [5] KAVEH HOUSHMAND. Detect Detection via THz Imaging: Potentials and Limitations. A Brief History of THz Imaging. Chapter 2, Terahertz Imaging: An Emerging Technology.
- [6] SIEGEL, P.H., 2003. THz Technology: An Overview. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, **13**(2), 351-394.
- [7] <http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2400/s2400005.htm>
- [8] KAVEH HOUSHMAND. Detect Detection via THz Imaging: Potentials and Limitations. A Brief History of THz Imaging. Chapter 2, Terahertz Imaging: An Emerging Technology. 2.2.1 Terahertz Pulsed Imaging: THz-TDS
- [9] KAVEH HOUSHMAND. Detect Detection via THz Imaging: Potentials and Limitations. A Brief History of THz Imaging. Chapter 2, Terahertz Imaging: An Emerging Technology. 2.2.2 Continuous-Wave Imaging
- [10] E. BRUNDERMANN AT AL. Terahertz Techniques. Chapter 7, Terahertz Imaging: 7.1 Introduction
- [11] E. BRUNDERMANN AT AL. Terahertz Techniques. Chapter 7, Terahertz Imaging: 7.2 Some Fundamentals of Imaging
- [12] E. BRUNDERMANN AT AL. Terahertz Techniques. Chapter 1, Terahertz Imaging: 7, 1 Introduction.
- [13] D. MITTLEMAN. Sensing with Terahertz Radiation. Terahertz imaging: Terahertz Imaging of Liquid Water.
- [14] B.B.HU AND M.C. NUSS. Imaging with Terahertz waves

- [15] Nondestructive evaluation of cork enclosures using terahertz/millimeter wave spectroscopy and imaging
<http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-47-1-72>
- [16] <http://www.diccionariodelvino.com/index.php/tricloroanisol/>
- [17] http://web.njit.edu/~federici/Research_Intro.htm#wireless
- [18] CIELSA, C.M., ARNONE, D.D., CORCHIA. Biomedical applications of Terahertz Pulse Imaging, Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers II.
- [19] ZHANG, Z., ZHANG, Y., ZHAO, G. and ZHANG, C., 2007. Terahertz time-domain spectroscopy for explosive imaging. *Optik*, **118**(7), 325-329.
- [20] D. MITTLEMAN. Sensing with Terahertz Radiation. Bio-medical Applications of THz Imaging. 5. Medical Imaging on Histopathological Samples
- [21] <http://odonto-cariesdental.blogspot.com.es/>
- [22] SIM, Y.C., MAENG, I. and SON, J.-. 2009. Frequency dependent characteristics of terahertz radiation on the enamel and dentin of human tooth. *Current Applied Physics*, **9**(5), 946-949.
- [23] <http://bme240.eng.uci.edu/students/09s/yango/Dermatology.html>
- [24] WANG WEI-NING, Correlations between Terahertz Spectra and Molecular Structures of 20 Standard α - Amino Acids
- [25] A.G.DAVIES, ET. AL.PHYS Med.Biol. 47 (2002) 3679-3689
- [26] MARKUS WALTHER, BERND M. FISCHER. Noncovalent intermolecular forces in polycrystalline and amorphous saccharides in the infrared
- [27] http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-833/1333_read-2400/
- [28] WOLFGANG BIRKFELLNER, MICHAEL FIGL, JOHANN HUMMEL. Applied medical image processing. A basic course. Chapter 2.4.
- [29] WOLFGANG BIRKFELLNER, MICHAEL FIGL, JOHANN HUMMEL. Applied medical image processing. A basic course. Chapter 2.1.
- [30] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22940-vol3d-v2>

- [31] <http://stackoverflow.com/questions/5570978/reset-axes-in-matlab>
- [32] http://help.scilab.org/docs/5.3.3/en_US/m2sci_cla.html
- [33] <http://www.youtube.com/watch?v=K45zDpSew98>